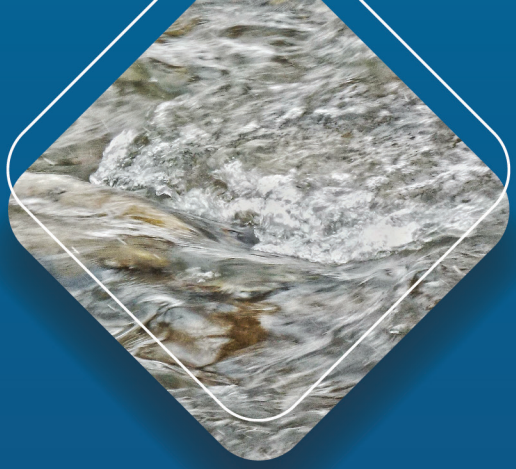
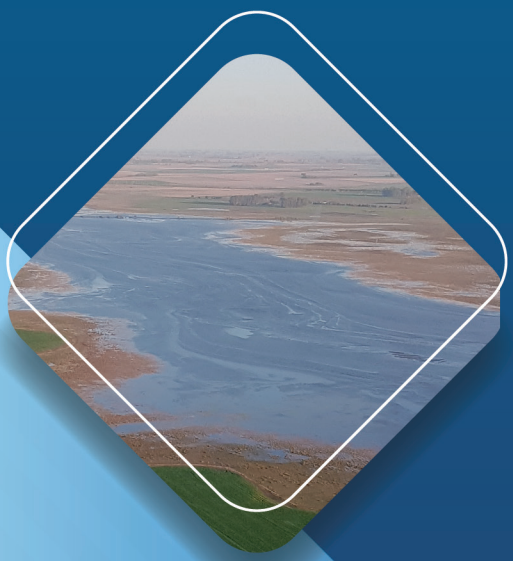
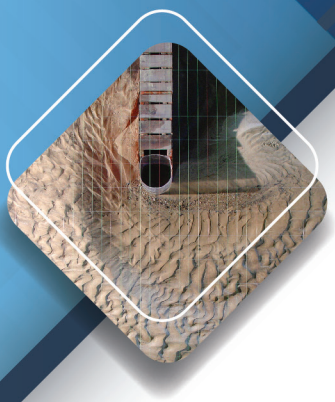






7

AGUA Y SOCIEDAD DEL CONOCIMIENTO

ÁGUA E SOCIEDADE DO CONHECIMENTO

- **Enseñanza y formación en el sector hídrico**
  Ensino e formação no setor hídrico
- **Historia de la hidráulica y de la ingeniería en el sector hídrico**
  História da hidráulica e da engenharia no setor hídrico
- **Problemas y desafíos hídricos en la región**
  Problemas e desafios hídricos na região
- **Planificación y gestión de los recursos hídricos**
  Planejamento e gestão dos recursos hídricos
- **Análisis y gestión de riesgo**
  Análise e gestão de risco

7 AGUA Y SOCIEDAD DEL CONOCIMIENTO

ÁGUA E SOCIEDADE DO CONHECIMENTO

CUANTIFICACIÓN DE LOS VOLÚMENES DE EXCESO Y DÉFICIT EN CURVAS GUÍA PARA DETERMINAR POLÍTICAS DE OPERACIÓN EN UN SISTEMA HIDROELÉCTRICO EN MÉXICO
Rosalva Mendoza Ramírez, Ramón Domínguez Mora, Maritza Arganis Juárez y Eliseo Carrizosa Elizondo 3566

REGLAS DE OPERACIÓN PARA INTERVALOS DE TIEMPO MENSUAL Y QUINCENAL EN UN SISTEMA HIDROELÉCTRICO EN MÉXICO
Rosalva Mendoza Ramírez, Ramón Domínguez Mora, Maritza Arganis Juárez y Andrés Olaf Santana Soto 3573

EVALUACIÓN MULTI-OBJETIVO DE REDES DE DRENAJE URBANO MEDIANTE UN MODELO DE SIMULACIÓN NUMÉRICA BIDIMENSIONAL
Carlos Martinez, Arlex Sanchez y Zoran Vojinovic 3581

OPTIMIZACIÓN DE LOS RECURSOS HÍDRICOS DE UN SISTEMA DE LLANURA. CASO DE ESTUDIO BAÑADO LA ESTRELLA (FORMOSA)
María Alejandra Cristanchi, Rosana Hämmerly y Miguel Ángel Valiente 3589

ESTADO ACTUAL DE PROYECTOS DE AGUA POTABLE Y SANEAMIENTO BÁSICO CON INVERSIÓN PÚBLICA Y CONSTRUCCIÓN DE PAZ
Claudia Marcela Amaya Pedraza 3601

MAPAS DE RIESGO POR INUNDACIÓN EN LA CIUDAD DE AGUASCALIENTES, MÉXICO A PARTIR DE MODELACIÓN HIDRÁULICA DEL DRENAJE URBANO
Ángel Bautista Tadeo, Luis Antonio Montesinos Pérez, Lucía G. Matías Ramírez y Nina Danae Ramírez González 3613

MODELO CONCEPTUAL DE PRONÓSTICO PARA LA OPERACIÓN DEL SISTEMA DE DRENAJE DEL VALLE DE MÉXICO
Guillermo Leal Báez 3625

¿QUÉ HACE QUE LOS SOCIO-ECOSISTEMAS SEAN SUSTENTABLES? ANÁLISIS DESDE UNA PERSPECTIVA INSTITUCIONAL
Verónica Farreras y Laura Ortega 3638

PROYECTO DE VIDEOS EDUCATIVOS DE LABORATORIO DE MECÁNICA DE FLUIDOS
Jorge Luis Zegarra Tarqui, Gean Lopes Teixeira, Edna Maria de Faria Viana, Aloysio Portugal Maia Saliba, Denise Maciel de Almeida Diniz y Carlos Barreira Martinez 3646

REVISIÓN DE METODOLOGÍAS PARA EL APROVECHAMIENTO DEL AGUA EN ZONAS URBANAS Y RURALES
Luisa Martínez-Acosta, Alvaro Alberto López-Lambraño y Alvaro Alberto López-Ramos 3651

EVALUACIÓN DE LA POLÍTICA DE DISTRIBUCIÓN DEL AGUA SUPERFICIAL DE LA CUENCA LERMA CHAPALA A 13 AÑOS DE SU IMPLEMENTACIÓN
María del Carmen Barragán, Ana Wagner, Raúl López y Ruperto Ortiz 3658

AS PERDAS DE ÁGUA NA TRAJETÓRIA DE UMA CIDADE
Daniel Bezerra Barros, Michele Dos Santos Lopes Cerqueira, Bruno de Melo Brentan y Lubienska Cristina Lucas Jaquiê Ribeiro 3668

LEVANTAMENTO DO PERFIL DE CONSUMO DE ÁGUA POR TIPO DE ESTABELECIMENTO COMERCIAL
Claudia Monteiro Carrillo, Natalia Calcina, André Franceschi de Angelis, Daniel Bezerra Barros y Lubienska Cristina Lucas Jaquiê Ribeiro 3678

MICRO TURBINAS HIDRÁULICAS. DISEÑOS, ADAPTACIONES PARA ENSEÑANZA DE MICROHIDROGENERACIÓN
Teresa Reyna, Maria Lábaque, Belén Irazusta, Santiago Reyna y Cesar Riha 3688

PROBLEMÁTICA ENTRE EL CAMBIO EN LA PRECIPITACIÓN EN LA PROVINCIA DE CÓRDOBA Y EL DISEÑO DE INFRAESTRUCTURA HIDRÁULICA
Maria Labaque, Teresa Reyna, Juan Valdes y Santiago Reyna 3699

APROVEITAMENTO DE ÁGUAS PLUVIAIS - ESTUDO DE CASO NA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
Rafaella Fonseca da Costa, Bruma Morganna Mendonça de Souza, Ana Cláudia Araújo Fernandes, Micheline Damião Dias Moreira, Ada Cristina Scudelari y Isabelly Bezerra Braga Gomes de Medeiros 3710

CARACTERIZACIÓN DEL RIESGO POR INUNDACIÓN EN CULTIVOS UBICADOS EN LLANURAS DE RÍOS DE PLANICIE
Beatriz Edith Vega Serratos, Gregorio Posada Vanegas y Ramón Domínguez Mora 3722

RELACIÓN ENTRE PIB, SERVICIOS DE AGUA Y SANEAMIENTO, POBLACIÓN Y TUGURIOS. ZONAS URBANAS EN AMÉRICA LATINA
Maria Alejandra Caicedo Londoño, Carlos Felipe Urazán Bonells, Luis Efrén Ayala Rojas y Sandra Liliana Uribe Celis 3734

MODELAGEM HIDROLÓGICA DISTRIBUÍDA PARA PEQUENAS BACIAS: UMA ABORDAGEM BASEADA EM AGENTES
Juan Carlos Ticona Gutierrez y Juan Martín Bravo 3742

UMA FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA ENSINO NA ÁREA DE MODELAGEM ECOLÓGICA DE COMUNIDADES AQUÁTICAS
Leonardo Facini Fernandes, Juan Martín Bravo, Juan Ticona, Lúcia Helena Ribeiro Rodrigues y David da Motta Marques 3748

RESULTADOS DE LAS ACCIONES DE EFICIENCIA DE 4 ORGANISMOS DE AGUA POTABLE DE LA CUENCA DEL LAGO DE PÁTZCUARO, MICHOACÁN, MÉXICO
Edgar Antúnez Leyva, José Manuel Rodríguez Varela, Jorge Arturo Casados Prior, Luis Gómez Lugo y Martha Patricia Hansen Rodríguez 3757

ENSEÑANZA EN AFOROS CON INSTRUMENTOS ULTRASONICOS
Mauricio de Jesús Escalante Estrada, J. Jesús Gómez Lázaro y José Alfredo González Verdugo 3768

CENTRO MEXICANO DE INNOVACIÓN EN ENERGÍA DEL OCÉANO: CEMIE-OCÉANO
Gregorio Posada Vanegas, Rodolfo Silva Casarín, Angélica Félix Delgado, Edgar Gerardo Mendoza Baldwin, Cecilia Enríquez Ortíz, Ismael Mariño Tapia, Francisco Ocampo Torres y Miguel Angel Alatorre Mendieta 3774

GESTIÓN DEL RIESGO ANTE INUNDACIONES EN ZONAS BAJAS DE TABASCO. UN ENFOQUE SOCIAL
Fernando Jorge González Villarreal, Joel Carbajal Barrera y Angélica Mendoza Mata 3782

PROPUESTA PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA RESILIENCIA ANTE INUNDACIONES EN TABASCO, MÉXICO
Juan Javier Carrillo Sosa, Jorge Fernando González Villarreal y Luis Samayoa Navarrete 3788

GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS NO CÓRREGO DO AMBRÓSIO, CAPITÓLIO-MG
Ana Claudia Nascimento e Silva, Afrânio Costa Pereira, Gabriel Soares da Silva, Germano de Oliveira Mattosinho, Lucimar Rodrigues de Oliveira y Vinny Yuri Oliveira 3797

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA INFORMÁTICA PARA EL USO INTEGRADO Y SOSTENIBLE DEL ALMACENAMIENTO HÍDRICO
Ximena Lemaitre, Germán Santos, Gerald Corzo y Héctor Angarita 3807

METODOLOGÍA PARA FORTALECER EL PROCESO DE FACTURACIÓN DE CONSUMOS EN ORGANISMOS OPERADORES DE AGUA POTABLE, ALCANTARILLADO Y SANEAMIENTO
Arturo López Zuñiga y Carlos Eduardo Mariano Romero 3815

IAHR AIIH
XXVIII CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA
BUENOS AIRES, ARGENTINA, SEPTIEMBRE DE 2018

CUANTIFICACIÓN DE LOS VOLÚMENES DE EXCESO Y DÉFICIT EN CURVAS GUÍA PARA DETERMINAR POLÍTICAS DE OPERACIÓN EN UN SISTEMA HIDROELÉCTRICO EN MÉXICO

Rosalva Mendoza Ramírez, Ramón Domínguez Mora, Maritza L. Arganis Juárez y Eliseo Carrizosa Elizondo
Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, México
rmr@pumas.iingen.unam.mx; rdm@pumas.iingen.unam.mx; MArganisJ@iingen.unam.mx; ecae@pumas.iingen.unam.mx

RESUMEN:

El trabajo tiene como objetivo cuantificar el volumen que se excede o que no se alcanza respecto a las curvas guía alta y baja, definidas por la dependencia federal encargada del manejo de los sistemas hidráulicos en México, para incluirlo en la evaluación de la función objetivo y obtener reglas de operación para un sistema de un solo embalse que tiene diversos usos, entre ellos el de generar energía eléctrica. La metodología empleada para definir las reglas de operación del sistema es la programación dinámica estocástica. Se tomaron las condiciones de un estudio reportado en el 2017 para el sistema hidroeléctrico de El Infiernillo para hacer un comparativo y ver si al incluir la cuantificación de los volúmenes de exceso y déficit se lograba una mejora en el funcionamiento histórico del embalse. Los resultados mostraron que de las cuatro variables que se monitorean dos de ellas presentaron mejoría, una permaneció sin cambio y la otra tuvo un desempeño menor. Este primer resultado muestra que el cuantificar estos volúmenes y penalizarlos de acuerdo a su magnitud mejora el desempeño del sistema.

ABSTRACT:

The objective of this work is to quantify the volume that is exceeded or not reached with respect to the high and low guide curves, defined by the federal agency responsible for the management of hydraulic systems in Mexico, to include it in the evaluation of the objective function and obtain operating rules for a single-reservoir system that has various uses, including the generation of electric power. The methodology used to define the rules of operation of the system is the dynamic stochastic programming. The conditions of a study reported in 2017 for the hydroelectric system of El Infiernillo were taken to make a comparison and see if including the quantification of excess and deficit volumes, an improvement in the historical operation of the reservoir was achieved. The results showed that of the four variables that were monitored, two of them showed improvement, one remained unchanged and the other had a lower performance. This first result shows that quantifying these volumes and penalizing them according to their magnitude improves the performance of the system.

PALABRAS CLAVES: curvas guía; sistema hidroeléctrico; políticas de operación

INTRODUCCIÓN

La operación de un sistema hidroeléctrico (SH) debe cumplir con hacer máximo el aprovechamiento del recurso almacenado y garantizar al mismo tiempo la seguridad en el manejo del embalse. Para ello, se diseñan reglas que tratan de tomar en cuenta todos los factores que influyen en el proceso, sin embargo, esto es complejo dada la naturaleza aleatoria de las variables de entrada y la cada vez más evidente alteración de patrones climatológicos. Así que, cada mejora que se haga a un modelo matemático que permita obtener y evaluar el desempeño de un sistema sea de un solo embalse o de múltiples embalses funcionando en paralelo o en serie, será una herramienta útil.

En el Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México se ha trabajado, desde hace ya tiempo, en conjunto con las dependencias oficiales encargadas del manejo de los sistemas hidráulicos en México, a saber: la Comisión Federal de Electricidad (CFE) y la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), en el diseño de políticas de operación de algunos de los sistemas de aprovechamiento hídrico más importantes de México, tratando de incluir los diversos factores que influyen en la operación del sistema y que las reglas de operación que se obtengan sean factibles de implementar y seguir por los operadores.

El SH que se estudia en este caso es el tercero en importancia, tanto por sus dimensiones como por su capacidad de generación de energía eléctrica, y se localiza entre los límites de los estados de Michoacán y Guerrero, en la parte centro sur de México (figura 1).

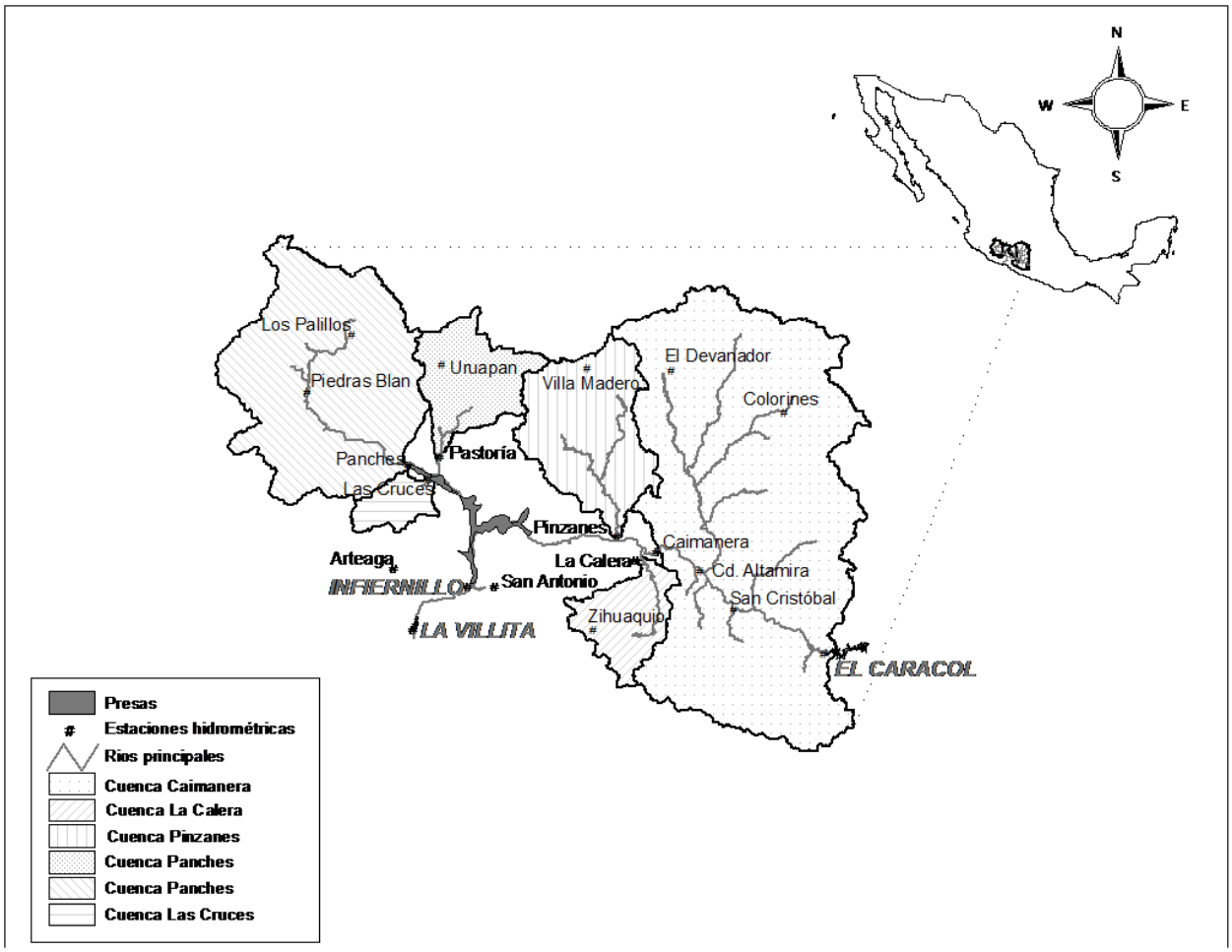


Figura 1.- Ubicación de la presa "El Infiernillo", sobre el río Balsas, México (Fuente: Domínguez et al., 2014).

La metodología empleada para determinar reglas de operación es la programación dinámica estocástica (PDE) y en la función objetivo (FO) se toma en cuenta el nivel de las curvas guía

definidas por la CONAGUA (curva guía alta (CG_A) y curva guía baja (CG_B)), para penalizar eventos por exceder o por quedar abajo de sus límites. En estudios anteriores, solo se penalizaba el evento restando un cierto valor definido para los coeficientes de castigo en la FO; en este nuevo estudio, se cuantifica la diferencia entre el límite de la curva guía y el volumen de almacenamiento alcanzado, multiplicando esta diferencia por el valor de penalización asignado y restándolo a la FO. Se realizaron varios ensayos probando diversos valores para los coeficientes de castigo y en el apartado correspondiente se presenta el que dio mejor resultado.

El artículo está organizado en cinco apartados: en el primero se describe en forma general el objetivo del trabajo, en el segundo se presenta el sitio de estudio, en el tercero se da la metodología empleada, el cuarto apartado da cuenta del resultado obtenido al simular el funcionamiento del sistema con el mejor ensayo, y finalmente en el quinto se presentan las conclusiones del estudio.

OBJETIVO

El presente estudio tiene como objetivo general el incluir en la función objetivo la cuantificación del volumen que se excede o que se queda por abajo de las curvas guía definidas por la CONAGUA y penalizar este exceso o déficit con coeficientes de castigo variables para cada etapa, y obtener reglas de operación para un sistema hidroeléctrico.

SITIO DE ESTUDIO

El embalse elegido para el estudio es la presa Lic. Adolfo López Mateos, conocida popularmente con el nombre de "El Infiernillo" (figura 1). Controla las aguas del río Balsas, uno de los más caudalosos del país. Nace en la región centro sur recorriendo aproximadamente 800 km hasta su salida en el océano Pacífico. Su cuenca se divide en tres subregiones (figura 2): Alto Balsas, Medio Balsas y Bajo Balsas. Según datos del 2007 tiene una disponibilidad total anual de aguas superficiales estimada en $24484 \cdot 10^6$ m^3 de escurrimientos vírgenes y retornos. El embalse geográficamente se localiza entre las coordenadas: 18° 21' 26'' a 18° 56' 04'' de Latitud norte y 101° 28' 16'' a 101° 59' 49'' de Longitud oeste, en los límites de los estados mexicanos de Guerrero y Michoacán. La precipitación anual promedio es de 622 mm, el período más seco se registra en invierno cuando la cantidad de lluvia es el 5% de la anual. La temperatura ambiental promedio anual es de 28.2 °C. La evaporación media anual es de 2848 mm (CONABIO, 2017).

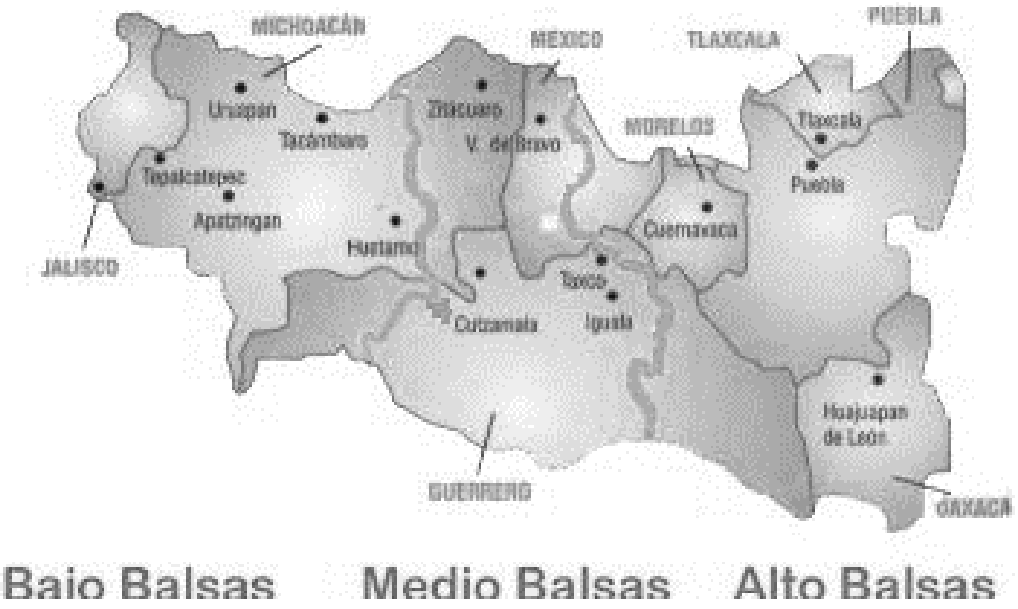


Figura 2.- Subregiones de la cuenca del río Balsas (Fuente: Jácome, 2018).

La presa fue construida por la extinta Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH) entre el período de agosto de 1960 a diciembre de 1963 y puesta en operación el 15 de

junio de 1964. El vaso tiene 120 km de largo y cubre un área de 400 km^2. Tiene una capacidad total de $12000 \cdot 10^6$ m^3 y 3 túneles vertedores que fueron diseñados para conducir un gasto máximo de 3500 m^3/s cada uno (Sánchez, 2011).

METODOLOGÍA

Las políticas de operación del SH de "El Infiernillo" se determinan usando la metodología de la PDE, los detalles del algoritmo se pueden consultar en Bellman (1957) y Nandalal y Bogardi (2007).

Inicialmente la FO queda expresada como:

$$FO = Max\ E\left[GE - C_{derr}\ Der - C_{def} Def\right] \quad [1]$$

donde: *E* es el operador del valor esperado, *GE* es la energía generada, *Der* es la magnitud del derrame y *Def* la del déficit, C_{der} *y* C_{def} son los valores de los coeficientes de penalización por derrame y por déficit, respectivamente.

Para tomar en cuenta las curvas guía y el volumen que se excede o que no se alcanza en el almacenamiento al final del periodo de tiempo, se agregó la lectura de un coeficiente de penalización en el caso de que se rebase o se esté por abajo de ellas y se calcula la diferencia entre el volumen almacenado y el límite de la curva guía alta o baja. La FO se calcula ahora como:

- Para el caso de rebase: Si j >CG_A entonces $FO = Max\ E\left[GE - C_{derr}\ Der - C_{def} Def\ - M_r CA\right]$
- Si el almacenamiento queda por abajo de la CG_B: Si j < CG_B entonces $FO = Max\ E\left[GE - C_{derr}\ Der - C_{def} Def\ - M_a CB\right]$

siendo j el almacenamiento al final de un intervalo de tiempo, M_r es la magnitud del rebase del límite de la CG_A, M_a es la magnitud de no haber alcanzado el límite de la CG_B, *CA* y *CB* son los coeficientes de penalización por rebasar la CG_A y por quedar abajo de la CG_B, respectivamente

Se partió de las mismas condiciones del estudio de Mendoza et al., (2017). La tabla 1 muestra los valores de penalización usados para los eventos de derrame, de déficit, de superar la curva guía alta (CG_A) y de quedar abajo de los límites de la curva guía baja (CG_B).

Se observó que en el estudio de referencia solo se penalizaba el exceder los límites de la CG_A y al buscar la explicación se vio que prácticamente no hay distinción en los valores de los límites de ambas curvas (figura 3), sin embargo, se optó aquí por incluir en el programa de cómputo el contemplar el caso de no alcanzar los límites de la CG_B, aunque los valores para penalización que se usaron fueron iguales a cero para poder comparar con los resultados del estudio de referencia. Para cada estado final de la presa se cuantifica ahora la diferencia entre el volumen correspondiente al límite de la curva guía (sea la CG_A o la CG_B) y el nivel alcanzado en el vaso, se usaron las ecuaciones recursivas de la PDE para obtener las nuevas reglas de operación y con ellas hacer el funcionamiento histórico del SH usando el mismo intervalo de tiempo (Δt = 15 días) del estudio del 2017.

Se definió así un primer ensayo y con la política obtenida se analizó el comportamiento de cuatro variables principales, a saber: derrame y déficit total, almacenamiento mínimo registrado en el vaso y cantidad promedio de energía generada.

Tabla 1.- Valores para penalizar eventos no deseados (Mendoza et al., 2017).

Ensayo 1				
Etapa	Derrame	Déficit	Superar CG_A	Abajo CG_B
*1q ene	4500	10000	4	0
**2q ene	4500	10000	4	0
1q feb	4500	15000	4	0
2q feb	4500	15000	4	0
1q mar	4500	17000	4	0
2q mar	4500	17000	4	0
1q abr	4500	18000	4	0
2q abr	4500	18000	4	0
1q may	4500	20000	4	0
2q may	4500	20000	4	0
1q jun	4500	20000	4	0
2q jun	4500	20000	4	0
1q jul	9500	3000	5	0
2q jul	9500	3000	5	0
1q ago	11500	3000	5	0
2q ago	11500	3000	5	0
1q sep	11500	3000	5	0
2q sep	11500	3000	5	0
1q oct	6500	5000	5	0
2q oct	6500	5000	5	0
1q nov	6500	5000	4	0
2q nov	6500	5000	4	0
1q dic	6500	5000	4	0
2q dic	6500	5000	4	0

*1q Primer quincena;
**2q Segunda quincena

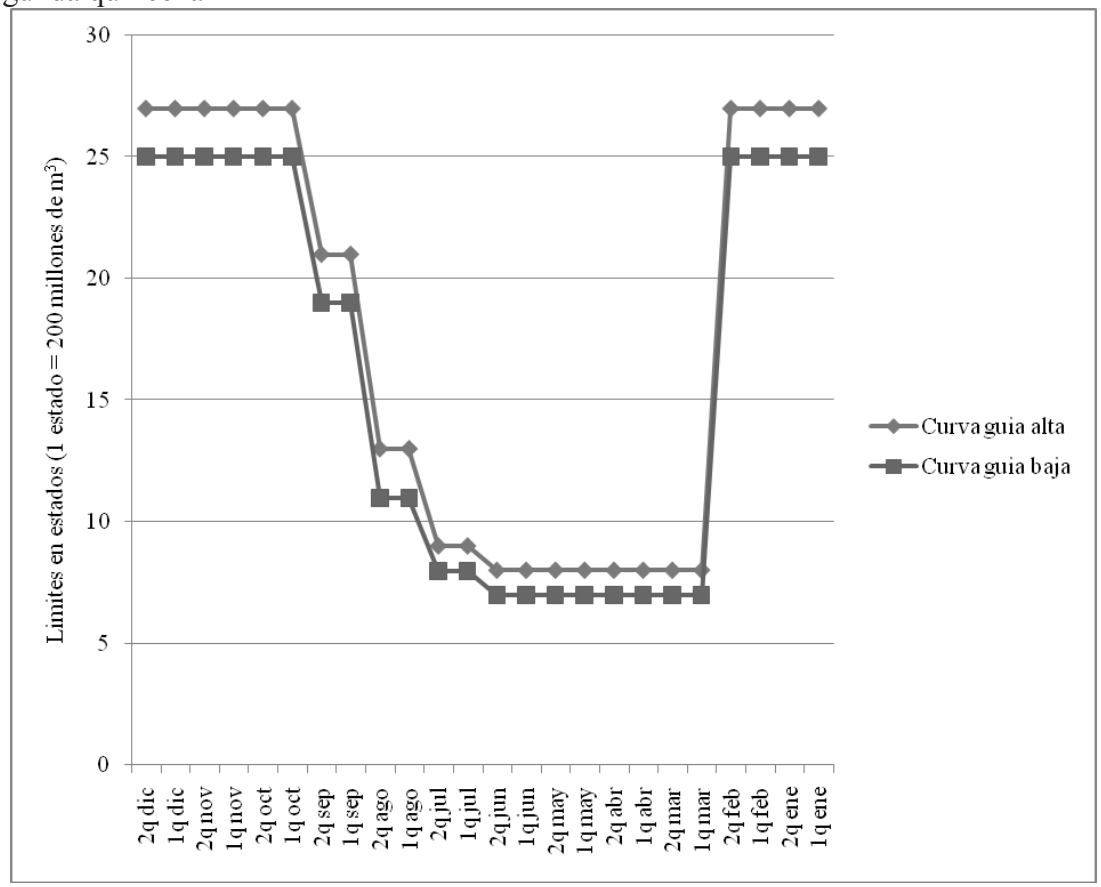


Figura 3.- Límites de almacenamiento definidos para la CG_A y la CG_B.

RESULTADOS

Los resultados del primer ensayo se muestran en la tabla 2, se puede observar que:

a) Al cuantificar el volumen que se excede o que no se alcanza a mantener en el vaso y penalizar el evento en la función objetivo, la política de operación logra reducir el déficit que tuvo el sistema en el estudio del 2017 casi un 80%, sin embargo, se tiene un derrame mayor.
b) Los niveles de almacenamiento que se alcanzan en el vaso logran un aumento del 2% en la variable de generación promedio de energía eléctrica.
c) La variable derrame tiene un aumento cercano a los 560 hm^3, que no es deseable que se presente pues los eventos de derrame tienen impactos negativos en las poblaciones aguas abajo del embalse ocasionando inundaciones y además ponen en riesgo la infraestructura física del sistema.
d) De las cuatro variables de interés, dos de ellas tienen mejor desempeño que en el estudio de referencia (déficit total y energía promedio generada).
e) Al haber déficit en el sistema, la variable almacenamiento mínimo registrado permanece sin cambio.

Tabla 2.- Comparación de resultados.

	Derrame (10^6 m^3)	Déficit (10^6 m^3)	Almacenamiento Mínimo (10^6 m^3)	Energía promedio (GWh/quincena)

Mendoza et al., 2017	7206	2242	0.0	139.6
Ensayo 1	7765	429	0.0	142.4

CONCLUSIONES

Este primer resultado muestra que el cuantificar los volúmenes de exceso y déficit y penalizarlos de acuerdo con su magnitud mejora el desempeño del sistema y permite continuar la línea de estudio para definir otros ensayos buscando mejorar las herramientas para definir reglas de operación y hacer lo más eficiente posible el uso del recurso agua.

Se debe continuar con más pruebas para lograr alcanzar al menos el valor de derrame del estudio del 2017 pero cuidando en mantener el comportamiento de las dos variables que mostraron mejoría.

REFERENCIAS

Bellman, R. (1957). *Dynamic Programming.* Princeton University Press. Princeton, N.J. USA.

Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). (2017). Regiones terrestres prioritarias de México. Infiernillo. Disponible en: www.conabio.gob.mx/conocimiento/regionalizacion/doctos/rtp_116.pdf

Domínguez, M. R. Arganis, J. M.L, Carrizosa, E. E., Fuentes, M. O., Mendoza, R. R., Esquivel, G. G., De Luna, C. F., Cruz, G. J. A., y Gómez, G. F. (2014). Estudio hidrológico y determinación de las políticas de operación de los vasos de almacenamiento de las presas en cascada sobre el Río Balsas: El Caracol (C. H. Carlos Ramírez Ulloa), Adolfo López Mateos (C. H. Infiernillo) y José Ma. Morelos y Pavón (C.H. La Villita). Informe final. Elaborado para La comisión Federal de Electricidad (CFE). México, D.F.

Jácome, L. (2018). Geografía: Depresión del Balsas. Disponible en: http://geograecologia.blogspot.mx/2012/10/depresion-del-balsas.html

Mendoza, R. R., Domínguez, M. R. y Arganis, J. M. L. (2017). Análisis del funcionamiento de un sistema hidroeléctrico en México con reglas de operación obtenidas para intervalos de tiempo mensual y quincenal. *Memorias V Jornadas de Ingeniería del Agua*, La Coruña, España.

Nandalal, K. D. W. y Bogardi, J. J. (2007). *Dynamic Programming Based Operation of Reservoirs. Applicability and Limits.* International Hydrology Series. Cambridge University Press.

Sánchez, M. A. M. (2011). De Anzaldúas a El Infiernillo (1950-1964). Breves apuntes sobre la contribución de José Luis Sánchez Bribiesca a la ingeniería de grandes presas. *Revista Digital Universitaria* [en línea]. Vol. 12, No. 2 Disponible en: http://www.revista.unam.mx/vol.12/num2/art12/index.html. ISSN: 1607-6079.

IAHR **AIIH**

XXVIII CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA
BUENOS AIRES, ARGENTINA, SEPTIEMBRE DE 2018

REGLAS DE OPERACIÓN PARA INTERVALOS DE TIEMPO MENSUAL Y QUINCENAL EN UN SISTEMA HIDROELÉCTRICO EN MÉXICO

Rosalva Mendoza Ramírez, Ramón Domínguez Mora, Maritza Liliana Arganis Juárez y Andrés Olaf Santana Soto

Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, México
rmr@pumas.iingen.unam.mx; rdm@pumas.iingen.unam.mx; MArganisJ@iingen.unam.mx; ASantanaS@iingen.unam.mx

RESUMEN:

El objetivo del trabajo fue determinar reglas de operación para un sistema hidroeléctrico en México. Se eligieron dos intervalos de tiempo, a saber: mensual y quincenal, y con cada uno de ellos se analizó el funcionamiento del sistema evaluando el comportamiento de 4 variables: derrame y déficit total, almacenamiento mínimo registrado y energía eléctrica promedio generada. La metodología empleada fue la programación dinámica en su variante estocástica. Los resultados mostraron que el sistema controla mejor el evento de derrame con políticas de operación definidas en forma quincenal y sin hacer grupos con características estadísticas similares. También se puso en evidencia la dificultad para encontrar el rango adecuado para los valores de los coeficientes de penalización para eventos no deseados (derrame y déficit, principalmente) y el peso que se le debe dar a cada uno de ellos. Es recomendable realizar nuevos ensayos hasta encontrar la combinación óptima que disminuya la magnitud del evento de déficit manteniendo el comportamiento del derrame y de la cantidad de energía promedio generada.

ABSTRACT:

The purpose of this paper is to obtain operation rules for two different time intervals: biweekly and monthly, and with each one make the simulation of the hydroelectric system viewing the behavior of 4 variables: total spill and deficit, minimum storage and average electric energy. The optimization technique used is the stochastic dynamic programming. The results showed that the spill is better controlled using biweekly operation rules and without grouping. Also it was revealed the difficulty to define the adequate interval to select the values for the penalization coefficients and the weight of each one in the objective function. It is advisable to continue with the trials to find the optimal combination that decreases the magnitude of the deficit event, maintaining the behavior of the spill and the amount of average energy generated.

PALABRAS CLAVES: políticas de operación; sistemas hidroeléctricos; coeficientes de penalización

INTRODUCCIÓN

El presente estudio consistió en la determinación de reglas de operación para un embalse con propósitos de generación de energía eléctrica, tomando intervalos de tiempo de quince y de treinta días, y con ellas hacer el funcionamiento del sistema usando los registros históricos de los volúmenes de ingreso correspondientes al intervalo de tiempo seleccionado. En general estas reglas buscan optimizar el uso del agua evitando en lo posible vertimientos y alcanzar niveles de almacenamiento que no permitan satisfacer los usos del recurso. La Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) y la Comisión Federal de Electricidad (CFE), son las dependencias federales encargadas del manejo de los sistemas de almacenamiento de agua en México y establecen límites para operarlos en forma segura y satisfacer los diversos usos que tenga el embalse. Sin embargo, estos límites no son en realidad una regla de operación en el sentido estricto de la definición y es por ello que en el Instituto de Ingeniería desde hace varios años se estudia, en conjunto con las dependencias federales, el manejo de los sistemas diseñando reglas de operación que sean factibles de implementar. La técnica usada ha sido la programación dinámica estocástica y la función objetivo diseñada incluye cada vez más factores tratando con ello de evitar derrames, déficits y rebase de los límites establecidos. En este estudio se tomó el registro histórico de ingresos mensuales y quincenales para el periodo 1965-2013 del sistema hidroeléctrico de El Infiernillo, el tercero más importante en México tanto por sus dimensiones físicas como por la cantidad de energía eléctrica que genera y aporta al Sistema Nacional de Energía. Lo primero que se hizo fue un análisis estadístico para obtener las funciones de densidad de probabilidad asociadas a los ingresos para los datos en forma quincenal pues las mensuales ya se tienen de estudios anteriores. Se diseñaron varios ensayos eligiendo valores para penalizar los eventos no deseados. Para cada uno de ellos se determinó la regla de operación y se simuló el funcionamiento del sistema evaluando cuatro variables principales: derrame y déficit total, almacenamiento mínimo y energía eléctrica promedio. Los resultados mostraron que el sistema controla mejor el evento de derrame con reglas de operación obtenidas en forma quincenal, pero tiene varios años con déficit, no afectando esto notablemente el promedio de energía generada, sin embargo, esta condición no es deseable que se presente.

El artículo está organizado en cinco apartados, a saber: en el primero se describe el objetivo del trabajo, el segundo presenta en forma amplia y general el sitio de estudio y la metodología utilizada, en el tercero se describe la aplicación al sistema hidroeléctrico de El Infiernillo, en el cuarto se presentan los resultados obtenidos, y finalmente en el quinto se dan las conclusiones y recomendaciones del estudio.

OBJETIVO

El objetivo general del estudio fue obtener reglas de operación óptima para dos intervalos de tiempo y simular con ellas el funcionamiento del sistema hidroeléctrico (SH) de El Infiernillo.

MATERIALES Y MÉTODOS

a) Sitio de estudio

La presa Adolfo López Mateos, mejor conocida como *El Infiernillo* (fig. 1), se ubica en los municipios de Arteaga, La Huacana y Churumuco del estado de Michoacán y en el municipio de Coahuayutla del estado de Guerrero. Geográficamente se localiza entre las coordenadas: 18° 21' 26'' a 18° 56' 04'' de Latitud norte y 101° 28' 16'' a 101° 59' 49'' de Longitud Oeste. La región presenta 4 tipos de clima, predomina en ella el semiárido- cálido, con temperatura media anual mayor de 22°C, temperatura del mes más frío mayor de 18°C; con un promedio de precipitación anual de 800 mm y con lluvias en verano del 5% al 10.2% de la anual (CONABIO, 2016).

Figura 1.- Ubicación de la presa "El Infiernillo", sobre el río Balsas, México (Fuente: Domínguez et al., 2014).

El embalse fue construido entre el período de agosto de 1960 a diciembre de 1963 y puesto en operación a mediados de 1964. Sus principales usos son: captar agua para la generación de energía eléctrica, el aprovechamiento para el riego y el control de avenidas. Consta de una cortina de enrocamiento con corazón impermeable. Tiene 149 m de altura y 350 m de longitud de la corona. La casa de máquinas es subterránea, con 21 m de ancho, 128 m de largo y 40 m de altura. En la margen izquierda se encuentra la obra de toma, distribuida en tres tuberías a presión con camisa de acero y 8.90 m de diámetro. La obra de excedencia se compone de tres vertedores de 13 m de diámetro, para descargar 13,800 m^3/s. Esta central hidroeléctrica se localiza en la zona de mayor riesgo sísmico del país y por tal motivo se evalúa continuamente el comportamiento dinámico de sus estructuras (SEMAR, 2016). El SH aprovecha las aguas del río Balsas, el tercero más largo de México (771 km) que nace tras la confluencia de los ríos San Martín y Zahuapán, en el estado de Puebla, y desemboca en el océano Pacífico. El vaso de El Infiernillo tiene 120 km de largo y cubre un área de 400 km^2. Su capacidad es de 12 mil millones de m^3. Es la tercera presa más grande del país y también la tercera en cuanto a generación de electricidad.

b) Técnica de optimización

Las políticas de operación del SH de El Infiernillo se determinan usando la metodología de la Programación Dinámica (PD) (Bellman, 1957) en su versión estocástica (PDE) (Nandalal y Bogardi, 2007). El inconveniente de la PD es el alto costo en recursos computacionales que demanda, para salvar esto en el Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, la técnica se trabaja separando el algoritmo de solución en dos partes; en la primera sólo se calcula el beneficio esperado por cada etapa, que se repite de un año a otro, en términos de la

función objetivo (FO) que tiene como fin en este caso maximizar la generación de energía eléctrica y disminuir la presencia de eventos no deseados. En la segunda parte se determina el beneficio acumulado hasta la etapa considerada y su valor óptimo, para ello se propone un número de años muy grande; en la etapa inicial se asignan valores de cero a los beneficios óptimos, se comienza el recorrido de las etapas en sentido contrario al tiempo y se resuelven las ecuaciones iterando hasta que las diferencias entre dos años consecutivos cumplen una tolerancia establecida que garantiza convergencia y estabilidad de la solución. Logrado esto, se guarda la extracción óptima (k_i^*) para la presa con su respectivo beneficio (B^*) (Mendoza et al., 2012).

$$\mathrm{B_n^k(i)} = \varphi_n^k(i) + \sum_{i=1}^{NS} P_n^k(\mathrm{i})\, \mathrm{B_{n+1}^*(j)}, \quad \text{siendo } \varphi_n^k(i) = \sum_{i=1}^{NS} P_n^k(\mathrm{i})\, b_n^k(i) \qquad [1]$$

Donde n es la etapa, k la extracción, i y j los estados inicial y final, respectivamente, B^* representa el beneficio óptimo, $b_n^k(i)$ es el beneficio que se obtiene en la etapa n si se decide una extracción k y se pasa del estado inicial i al final j y $P_n^k(\mathrm{i})$ son las probabilidades de transición de la etapa n obtenidas a partir de la distribución de probabilidades de los ingresos

APLICACIÓN

De estudios anteriores (Mendoza et al., 2016, 2017) se tomó un intervalo de 200 hm^3 para discretizar la capacidad útil del embalse y los volúmenes de ingreso, el número de etapas definidas y extracciones máximas y mínimas para cada una, límites de la curva guía alta (CGA) y baja (CGB), ecuaciones de ajuste y datos generales del sistema. Se usaron los registros de ingresos históricos para el periodo en forma mensual y quincenal para hacer primero un análisis estadístico y determinar las probabilidades asociadas a ellos. La figura 2 muestra los volúmenes promedio para cada quincena y para cada mes.

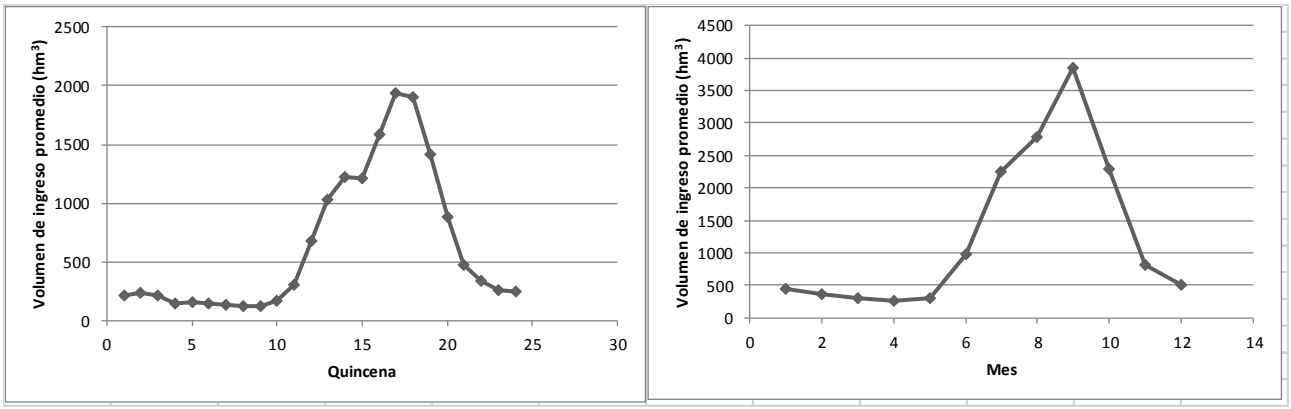


Figura 2.- Volúmenes de ingreso promedio por quincena y por mes.

En el caso del análisis mensual se hace un agrupamiento de meses tratando de que las medias estadísticas de cada grupo sean lo más parecidas entre sí, esto llevó a definir seis etapas (tabla 1) y para cada una de ellos se calculan las probabilidades asociadas a los volúmenes de ingreso. La figura 3 muestra las probabilidades del ingreso solamente para los meses de septiembre, octubre y de marzo a junio. En el caso quincenal se optó por no hacer ningún agrupamiento para evitar perder o suavizar la información. Los valores de las probabilidades del ingreso para algunas quincenas seleccionadas se muestran en la figura 4.

Tabla 1.- Etapas definidas para el caso mensual.

Etapa	Meses	Etapa	Meses
1	Octubre	4	Julio
2	Septiembre	5	Marzo-junio
3	Agosto	6	Noviembre-febrero

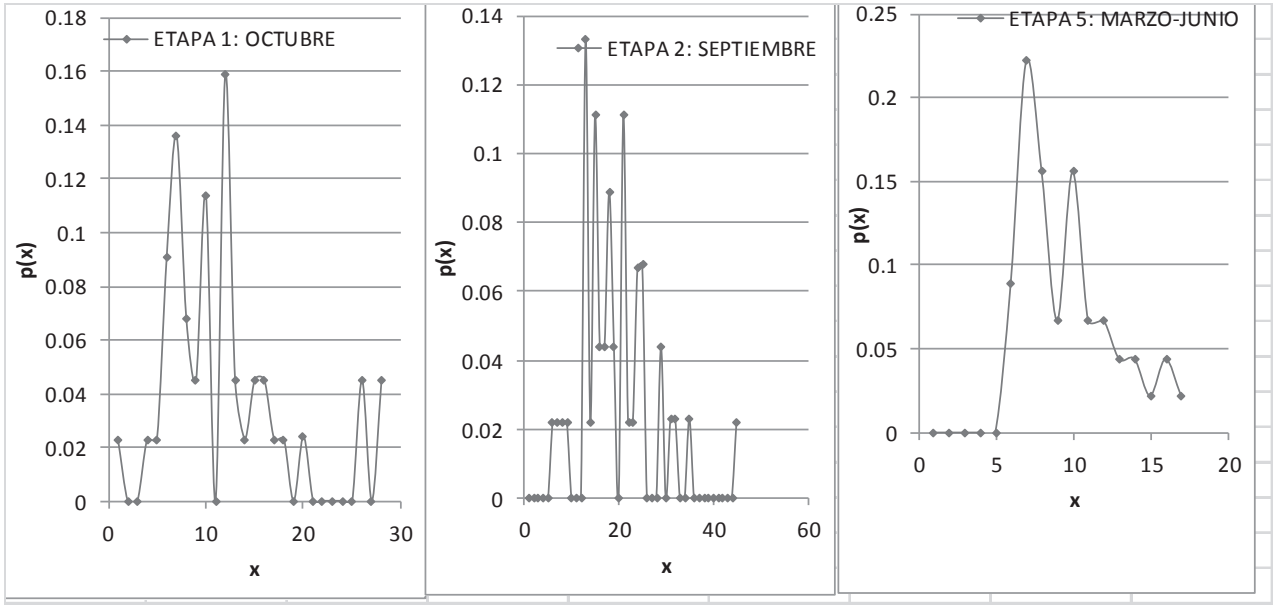


Figura 3.- Probabilidades asociadas a los volúmenes de ingreso (Δt = 1 mes) para los meses de octubre, septiembre y marzo-junio.

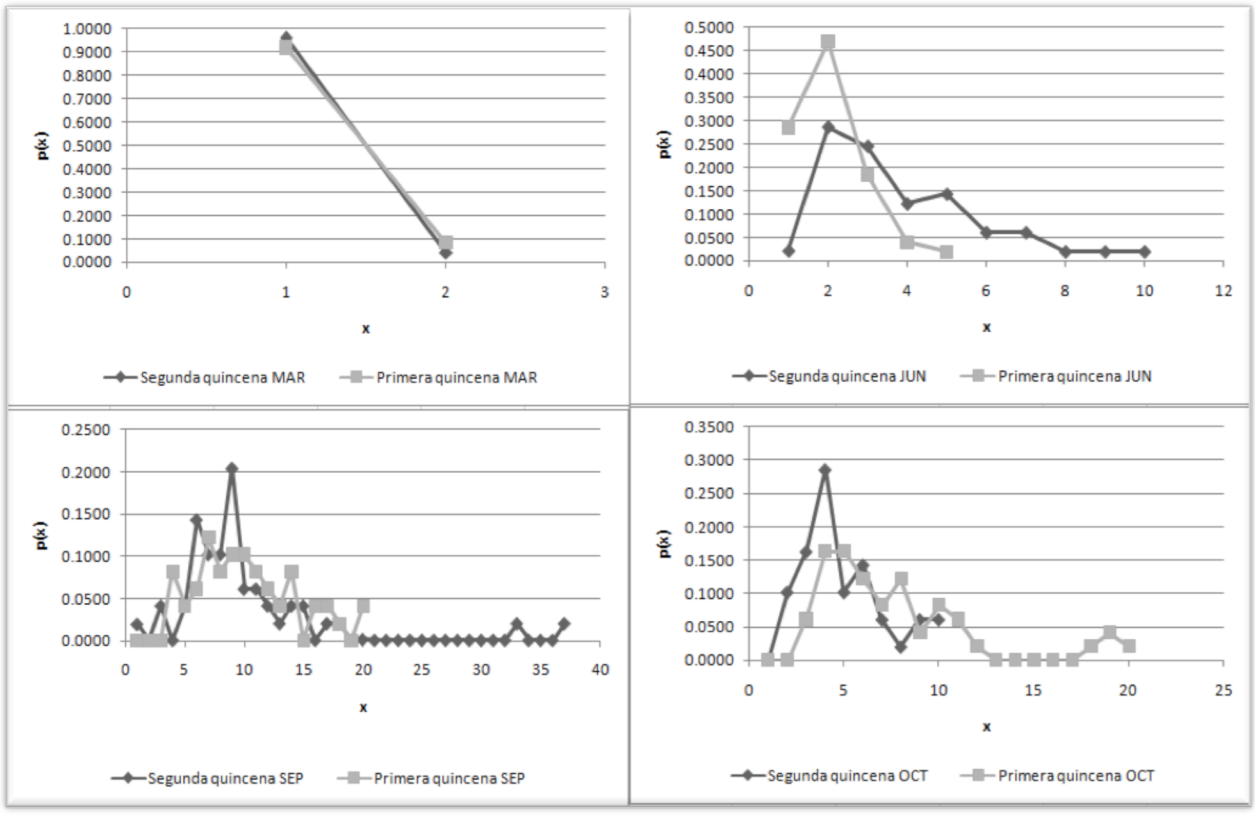


Figura 4.- Probabilidades asociadas a los volúmenes de ingreso (Δt= 15 días) para las dos quincenas de marzo, junio, septiembre y octubre.

El estudio del 2016 (Mendoza et al., 2016) introduce en el proceso de obtención de reglas de operación el variar para cada etapa el valor de los coeficientes de penalización para los eventos no deseados (déficit y derrame). El del 2017 (Mendoza et al., 2017) adiciona en el proceso de simulación el poder modificar el volumen que dicta la política aumentando o restando un cierto volumen en función de la variación temporal del coeficiente de autocorrelación. En ambos estudios se usó el registro histórico de volúmenes de ingreso mensual al embalse, una curva guía (alta) y se

obtenían reglas de operación para ese intervalo. En el proceso de simulación se podía usar un paso de tiempo de 15 días y lo que se hacía para dar el volumen de extracción era simplemente tomar el que dictaba la política y dividirlo entre las dos quincenas del mes. En este nuevo estudio, se mantienen las condiciones de los trabajos referidos, pero se obtienen reglas de operación usando los volúmenes de ingreso en forma quincenal y sin buscar formar grupos con características estadísticas homogéneas y variando ahora también los valores de los coeficientes para penalizar el quedar por abajo de la CGB y el rebasar los límites de la CGA. Estas dos curvas son límites que una de las dependencias federales (La CONAGUA) encargadas del manejo del sistema establece para garantizar la operación segura del embalse. Los 3 ensayos definidos se muestran en la tabla 2 y los resultados se detallan en el siguiente apartado.

Tabla 2.- Ensayos definidos.

Quincena	Penalización para los coeficientes					
	Ensayo 1				Ensayo 2*	Ensayo 3**
	Derrame	Déficit	CG_A	CG_B	CG_A	CG_B
1Q DIC	6500	5000	4	1	0	0
2Q DIC	6500	5000	4	1	0	0
1Q NOV	6500	5000	4	1	0	0
2Q NOV	6500	5000	4	1	0	0
1Q OCT	6500	5000	5	0.8	0	0
2Q OCT	6500	5000	5	0.8	0	0
1Q SEP	11500	3000	5	0.8	0	0
2Q SEP	11500	3000	5	0.8	0	0
1Q AGO	11500	3000	5	0.8	0	0
2Q AGO	11500	3000	5	0.8	0	0
1Q JUL	9500	3000	5	0.8	0	0
2Q JUL	9500	3000	5	0.8	0	0
1Q JUN	4500	20000	4	1	0	0
2Q JUN	4500	20000	4	1	0	0
1Q MAY	4500	20000	4	1	0	0
2Q MAY	4500	20000	4	1	0	0
1Q ABR	4500	18000	4	1	0	0
2Q ABR	4500	18000	4	1	0	0
1Q MAR	4500	17000	4	1	0	0
2Q MAR	4500	17000	4	1	0	0
1Q FEB	4500	15000	4	1	0	0
2Q FEB	4500	15000	4	1	0	0
1Q ENE	4500	10000	4	1	0	0
2Q ENE	4500	10000	4	1	0	0

* Coeficientes para penalizar derrame, déficit y CGB iguales a los del ensayo 1. ** Coeficientes para penalizar derrame, déficit y CGA iguales a los del ensayo 1. CG_A es el coeficiente para penalizar el exceder el límite de la CGA. CG_B es el coeficiente para penalizar el no alcanzar el límite de la CGB.

RESULTADOS

Las políticas de operación del SH se determinan usando la metodología de la PDE. Con cada política se simula el funcionamiento del sistema evaluando cuatro variables principales: derrame y déficit total, almacenamiento mínimo y energía eléctrica promedio. Los resultados obtenidos para cada uno de los tres ensayos se muestran en la tabla 3 y de su análisis se puede decir lo siguiente:

a) En general el sistema controla mejor el evento de derrame con reglas de operación obtenidas en forma quincenal, pero tiene varios años con déficit, no afectando esto notablemente el promedio de energía generada.
b) El ensayo 2 presenta un derrame similar en magnitud al del estudio del 2017 pero el déficit total es casi 4 veces más. En ambos se penaliza el derrame y el déficit pero en el del 2017 la penalización al quedar por debajo de los límites de la curva guía baja (CGB) no existe y los coeficientes de penalización por exceder los límites de la curva guía alta (CGA) van de 0,8 a 2, y en el ensayo 2 la penalización por rebasar los límites de la CGA es cero y los coeficientes de penalización para la CGB van de 0.8 a 1, lo cual lleva a la conclusión de que dejar nula la penalización de la CGA sacrifica los niveles de almacenamiento en el embalse para conseguir mantener la generación de energía promedio.
c) Los ensayos 1 y el 3 muestran que la penalización en la CGB es tal vez la de menor peso en la FO. Ambos obtienen prácticamente el mismo desempeño en cuanto a los parámetros analizados.
d) Los ensayos 1 y 3, logran reducir la magnitud total del evento de derrame presentado en el estudio del 2017 (Mendoza et al., 2017).
e) La variable de la energía promedio es poco sensible a los cambios en los valores de los coeficientes de penalización para los eventos de derrame, déficit, quedar por debajo de la CGB y rebasar los límites de la CGA.

Tabla 3.- Comparación de resultados.

Estudio	Derrame (hm^3)	Déficit (hm^3)	Almacenamiento mínimo (hm^3)	Energía promedio generada (GWh/quincena)
Mendoza et al., 2016	11320.2	0.0	271.0	144
Mendoza et al., 2017	10675.2	470.1	0.0	144
Ensayo 1	7830.32	2635.06	0.0	141.09
Ensayo 2	10597.12	1682.24	0.0	144.21
Ensayo 3	7830.32	2626.36	0.0	140.47

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los resultados mostraron que obtener políticas de operación usando intervalos de tiempo de 15 días conduce a un mejor control en el evento de derrame que al simular su funcionamiento con reglas de operación obtenidas para un Δt de 30 días.

El reducir el intervalo de tiempo de 30 días a 15 días y no hacer agrupamiento de meses tratando de que una de las medidas de dispersión (la media en este caso) sea similar en los grupos, permite establecer diferencias de comportamiento en los volúmenes de ingreso de un mismo mes.

En todos los casos que se han analizado, la variable menos sensible a los cambios hechos ha sido la energía generada, tal parece que a pesar de los meses con déficit los niveles de almacenamiento que se mantienen en el vaso durante la simulación compensan esto.

Se hicieron diferentes ensayos con los cuales se puso en evidencia la dificultad para

encontrar tanto el rango adecuado para los valores de los coeficientes de penalización para eventos no deseados como el peso que se le debe dar a cada uno de ellos. Es recomendable seguir con los ensayos para ver si se logra encontrar la combinación óptima que disminuya la magnitud del evento de déficit manteniendo el comportamiento del derrame y de la cantidad de energía promedio generada.

Es también conveniente cuantificar la magnitud de exceder o quedar abajo de las curvas guía para que la penalización que se añade por esto en la FO sea variable.

REFERENCIAS

Bellman, R. E. (1957). *Dynamic Programming*. Princeton. NJ. Princeton University Press.

Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). (2016). Regiones terrestres prioritarias de México. Infiernillo. Disponible en: www.conabio.gob.mx/ conocimiento/regionalizacion/doctos/rtp_116.pdf

Domínguez, M. R. Arganis, J. M.L, Carrizosa, E. E., Fuentes, M. O., Mendoza, R. R., Esquivel, G. G., De Luna, C. F., Cruz, G. J. A., y Gómez, G. F. (2014). Estudio hidrológico y determinación de las políticas de operación de los vasos de almacenamiento de las presas en cascada sobre el Río Balsas: El Caracol (C. H. Carlos Ramírez Ulloa), Adolfo López Mateos (C. H. Infiernillo) y José Ma. Morelos y Pavón (C.H. La Villita). Informe final. Elaborado para La comisión Federal de Electricidad (CFE). México, D.F.

Mendoza, R., Domínguez, R. y Arganis, M. (2012). "Influencia de curvas guía en las políticas de operación para el manejo de un sistema hidroeléctrico". *Memorias del XXV Congreso Latinoamericano de Hidráulica*, 9-12 Septiembre, San José, Costa Rica.

Mendoza, R., Arganis, M. y Domínguez, R. (2016). "Efecto de la variación por etapa en los coeficientes de castigo para obtener reglas de operación: presa El Infiernillo, Mich., México". *Memorias del XXVII Congreso Latinoamericano de Hidráulica,* 28-30 Septiembre, Lima, Perú.

Mendoza, R., Arganis, M. y Domínguez, R. (2017). "Análisis de la inclusión de la variabilidad temporal del coeficiente de autocorrelación en la simulación de un sistema hidroeléctrico en México". *Memorias del XIII Congreso Internacional de Hidráulica*, 21-25 Marzo, La Habana, Cuba.

Secretaría de Marina Armada de México (SEMAR). (2016). Presa de El Infiernillo. Disponible en http://digaohm.semar.gob.mx/cuestionarios/cnarioInfiernillo.pdf

IAHR **AIIH**

XXVIII CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA
BUENOS AIRES, ARGENTINA, SEPTIEMBRE DE 2018

EVALUACIÓN MULTI-OBJETIVO DE REDES DE DRENAJE URBANO MEDIANTE UN MODELO DE SIMULACIÓN NUMÉRICA BIDIMENSIONAL

Carlos Martínez[1], Arlex Sanchez[2] y Zoran Vojinovic[2]
[1]Programa de Ingeniería Civil – Facultad de Ingeniería, Universidad del Magdalena, Santa Marta - Colombia
cmartinez@unimagdalena.edu.co
[2]Departamento de Ingeniería Ambiental y Tecnología del Agua, IHE-Delft,
Instituto para la Educación del Agua, Delft – Holanda
a.sanchez@un-ihe.org, z.vojinovic@un-ihe.org.

RESUMEN:

El presente trabajo describe una metodología con el fin de evaluar la capacidad que tiene un sistema de drenaje urbano de transportar eficientemente las aguas pluviales. Se proponen tres medidas de rehabilitación: Renovación de las Tuberías (RT), Sistemas de Almacenamiento Distribuido (SAD) y la combinación de ambas medidas (RT+SAD). La evaluación se plantea como un problema de optimización multiobjetivo con el fin de minimizar los costos de daños por inundación y el costo de inversión en el remplazo o actualización de tuberías. También se incluye el enfoque de los Costos Anuales de Daños Esperados (CADE) como el costo probabilístico causado por las inundaciones para varios eventos de inundación. El estudio combina herramientas computacionales como un modelo hidrodinámico de simulación numérica bidimensional (1D/2D) y un algoritmo de optimización. Las ventajas de la presente metodología se demuestran en un caso real en la cuenca urbana de Segunbagicha en la ciudad de Dhaka, Bangladesh. Las soluciones óptimas confirman la utilidad y efectividad de los métodos propuestos en particular; los costos de rehabilitación y daños por inundación se reducen con la implementación óptima de las medidas RT y SAD.

ABSTRACT:

The present work describes a methodology to evaluate the capacity of an urban drainage system to efficiently transport stormwater. Three rehabilitation measures are proposed: the Upgrading of Pipes (UP), Distributed Storage (DS) and the combination of both (UP+DS). It is posed as a multi-objective optimisation problem with the aim of minimising rehabilitation costs and flood damage. The approach of Expected Annual Damage Cost (EADC) was also introduced as the probabilistic cost caused by floods for a number of probable flood events. The study combines computational tools such as a 1D/2D flood inundation model and an optimisation algorithm. The advantages of this approach are demonstrated on a real-life case study in Dhaka City, Bangladesh. The optimal solutions confirm the usefulness and effectiveness of the proposed approach where both rehabilitation and damage costs are reduced by the optimal implementation of the UP and DS measures.

PALABRAS CLAVES: Capacidad del sistema, Drenaje urbano, Medidas de rehabilitación, Optimización multiobjetivo.

INTRODUCCIÓN

Las inundaciones en áreas urbanas se han convertido en un problema importante y creciente para las empresas prestadoras de servicios públicos. En muchas ciudades del mundo, los Sistemas de Drenaje Urbano (UDS) están llegando al final de su vida útil y la rehabilitación oportuna de dichos sistemas es imprescindible dentro de una adecuada gestión. Diferentes experiencias han demostrado que la principal limitación de los sistemas de drenaje convencionales está relacionada con sus actividades operativas y de mantenimiento, junto con las limitaciones financieras, sociales y de adaptación del contexto local (Schellekens et al., 2015). El reciente progreso en el desarrollo de drenaje sostenible en diferentes campos disciplinarios sugiere un nuevo objetivo relacionado con la "sostenibilidad" de los sistemas de drenaje urbano que toma en cuenta la gestión del drenaje urbano como un componente del ciclo urbano del agua (Zhou et al., 2013).

Investigaciones que intentan mejorar el funcionamiento de los sistemas urbanos de agua han experimentado mejoras significativas (p. ej. Martínez et al., 2014-a; Mugume et al., 2015; Diao et al., 2016). Los resultados de estos estudios han aportado herramientas y técnicas que pueden permitir el desarrollo e implementación de soluciones más efectivas y resilientes. El uso de modelos numéricos y técnicas de optimización también han demostrado ser invaluables para tratar diversos problemas de rehabilitación del sistema. Con modelos y técnicas de optimización, es posible explorar el funcionamiento de las redes de drenaje y evaluar la efectividad de las diferentes medidas de intervención. Sin embargo, existen varias consecuencias que requieren una consideración cuidadosa para usar modelos numéricos de manera más efectiva (Vojinovic et al., 2014; Galindo et al., 2015).

La optimización multiobjetivo de Sistemas de Drenaje Urbano (SDU) que incluye el enfoque de modelación numérica bidimensional (1D/2D) también ha tenido algunas ventajas significativas (Martínez et al., 2014-b) y los resultados obtenidos demuestran su potencial para resolver algunos de los mayores desafíos que enfrentan las empresas de servicios públicos de nuestras ciudades hoy en día. A pesar del notable progreso logrado en las últimas dos décadas en el área de gestión sostenible del agua urbana, todavía existe el desafío de cómo asegurar y administrar las inversiones en infraestructura para que los sistemas cumplan continuamente con los estándares de servicio y los desafíos planteados por el cambio climático.

El presente documento proporciona una contribución en esta dirección al presentar un enfoque novedoso que combina modelos 1D/2D con un algoritmo de optimización con el fin de buscar soluciones óptimas para un sistema de drenaje que necesita rehabilitación. La principal ventaja de este enfoque es que se puede retener la física e interacciones necesarias en los cálculos entre el sistema de drenaje (p. ej. red de tuberías subterráneas) y las superficies urbanas (p. ej. vías y edificaciones) mientras se busca un conjunto óptimo de medidas de rehabilitación. En términos de desventajas, una de las desventajas clave es que este enfoque requiere un tiempo computacional bastante extenso que limita su aplicación para propósitos de tiempo real.

MATERIALES Y METODOS

La información principal para construir el modelo de escorrentía superficial 2D, incluye un modelo de elevación digital (DEM) generado en un archivo raster y convertido a un formato ASCII. Para construir el modelo 1D y simular el SDU, se incluyen los datos requeridos tales como la topología de la red, conductos, pozos de inspección, salidas, subcuencas de captación y caudales para períodos en tiempo seco (CTS). Se utilizaron eventos de lluvia a partir de hietogramas de diseño con base en las curvas de intensidad, duración y frecuencia (IDF).

Para la evaluación de los daños potenciales de los eventos de inundación se requieren las curvas de profundidad del agua versus daños. Estas curvas denotan el daño por inundación que ocurriría a profundidades de agua específicas normalmente clasificadas para diferentes sectores de acuerdo con el uso del suelo (p. ej. residencial, comercial, institucional). De igual manera se requieren costos unitarios de los principales componentes involucrados en obras de rehabilitación, como los costos de materiales y actividades de movimiento de tierras.

La modelación hidráulica comprende dos modelos acoplados para simular la dinámica de flujo en la red de drenaje y en el flujo superficial. El proceso hidrológico de lluvia-escorrentía y el tránsito de caudales en las tuberías de drenaje se calcularon utilizando EPA SWMM v5.0. Cuando se supera la capacidad de la red de tuberías, el exceso de flujo se vierte en el dominio bidimensional del modelo a través de los pozos de inspección para luego ser transitado utilizando el modelo de simulación numérica no convectivo 2D desarrollado en el trabajo previo de Seyoum et al. (2012). Este modelo se basa en el esquema implícito de dirección alterna que resuelve las ecuaciones 2D de agua superficial conocidas como las ecuaciones de Saint-Venant en 2D. Este sistema de ecuaciones diferenciales supone que el flujo bidimensional sobre la superficie inundada es un fenómeno lento y poco profundo de modo que los términos de aceleración convectiva pueden ignorarse ya que estos son lo suficientemente pequeños en comparación con los otros términos de la ecuación.

El resultado del modelo de simulación numérica bidimensional (1D/2D) es una matriz con los valores de la profundidad de inundación a través de la superficie inundada. Estos valores se utilizaron para calcular los costos de daños por inundación dentro del proceso de optimización del SDU. El marco de optimización se desarrolló e implementó en el entorno EMBARCADERO (anteriormente conocido como Borland Delphi). Se codificó una primera rutina para ejecutar el modelo 1D SWMM y de esta manera calcular el valor inicial de las variables, las funciones objetivo y el valor máximo de los costos originales. También se codificó una segunda rutina para ejecutar el modelo bidimensional (1D/2D), seleccionar las tuberías sobrecargadas para su reemplazo, cambiar el tamaño del almacenamiento seleccionado y calcular las funciones objetivo que para este estudio fueron los costos de daños por inundación, costos de rehabilitación. El enfoque de los Costos Anuales de Daños Esperados (CADE) fue agregado al algoritmo de optimización para calcular los daños esperados. Este método se basa en calcular el daño anual esperado mediante la integración de una función de riesgo (Barreto, 2012). Los valores de las funciones objetivo se vincularon con el algoritmo optimizador NSGA II desarrollado y presentado en Deb et al. (2002) para encontrar el conjunto de mejores soluciones. La Figura 1 presenta la metodología de optimización aplicada en este trabajo.

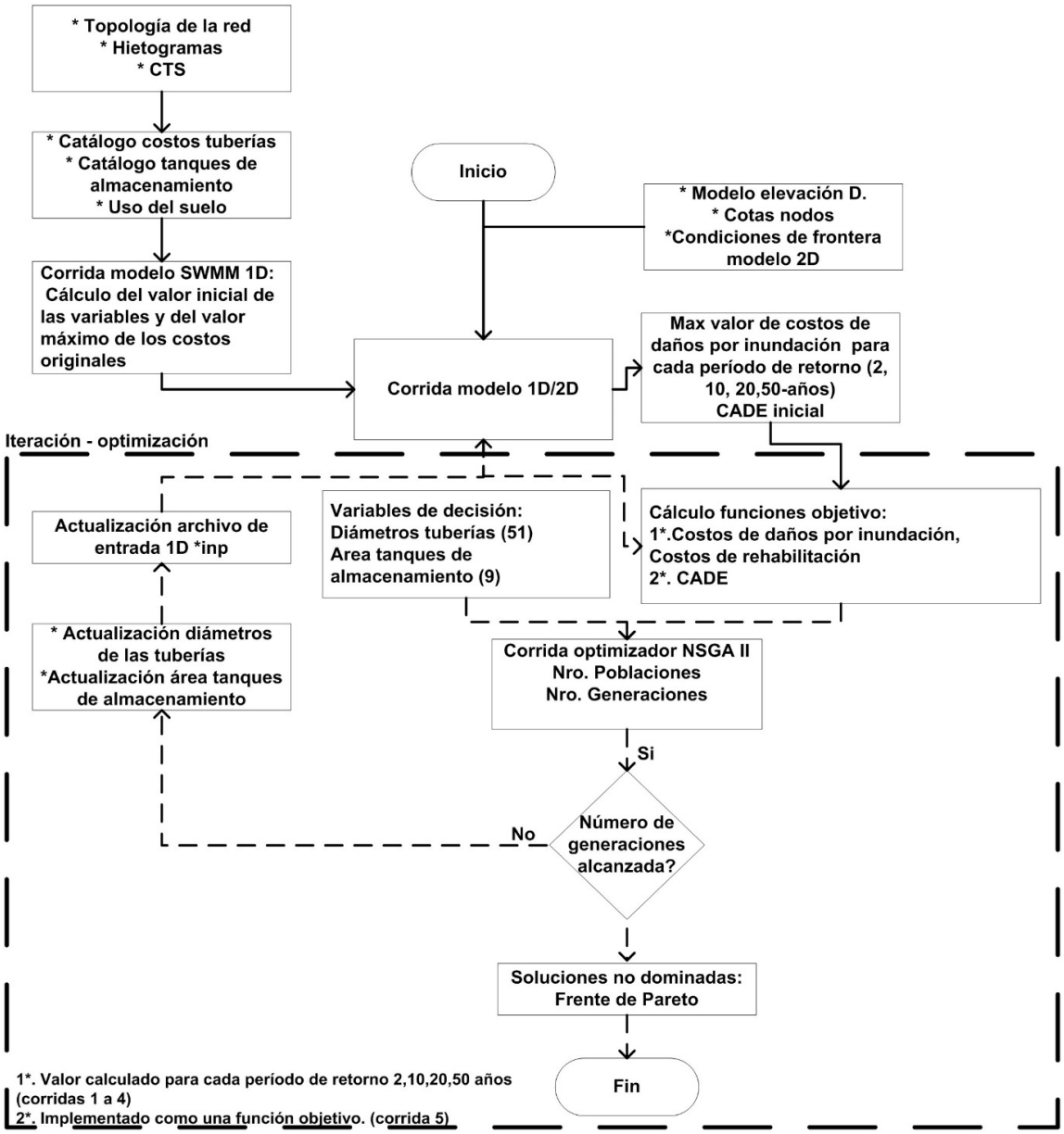


Figura 1.- Diagrama de flujo del marco aplicado.

Las funciones objetivo implementadas se definieron de la siguiente manera: El costo real de la red de tuberías se calculó teniendo en cuenta el diámetro y la longitud de la tubería mediante la ecuación 1:

$$RCost = \sum_{i=1}^{n}(C(P)_i) * L_i \qquad [1]$$

Donde *RCost* es el costo de rehabilitación de las tuberías, *i* es el índice de las tuberías, *n* es el número de tuberías que se deben reemplazar, *C(P)i* es el costo de la tubería y L_i es la longitud de la tubería. *C(P)i* en la ecuación 1 proviene de la elaboración de un catálogo de costos de tubería, este catálogo se calcula utilizando la ecuación 2.

$$C = k * D^m \qquad [2]$$

Donde *C* es el costo de la tubería por unidad de longitud, *D* es el diámetro de la tubería y la variable de decisión a optimizar. *k* y *m* son coeficientes y exponente definidos a partir de los costos.

Para los tanques de almacenamiento, se han incluido los costos de materiales, equipos y

mano de obra. La ecuación 3 permite calcular el costo de acuerdo con el volumen de almacenamiento.

$$SCost = K * V^n \qquad [3]$$

Donde *SCost* es el costo total de almacenamiento, *K* es el coeficiente para tanques de almacenamiento construidos en concreto, *n* es el exponente para estanques húmedos y V es el volumen de almacenamiento en m^3 y la variable de decisión a optimizar. La estimación de los costos directos de daños por inundación se realizó en función de la profundidad máxima de inundación en la superficie. Los costos de daños en cada celda (grilla) del modelo 2D se calcularon mediante la ecuación 4 dado por:

$$\text{CostDaños}[i,j] = (\propto + \beta) * \text{MaxWdpth}[i,j] \quad [4]$$

Donde α es una pendiente de la curva asociada con el valor del uso del suelo, β es una intersección asociada de igual manera con el uso del suelo y MaxWdpth [i, j] es la profundidad máxima del agua en las celdas [i, j]. CADE es el costo probabilístico causado por las inundaciones para una serie de eventos probables. Este es el valor esperado del costo de daño que ocurre cuando se consideran las inundaciones por diferentes eventos de lluvia. CADE se calculó a partir de la profundidad del agua y los datos espaciales de uso del suelo. Se expresa a través del diagrama de Pareto, que representa el costo esperado en un año para diferentes períodos de retorno de lluvia.

En el presente trabajo, se utilizaron cuatro eventos de lluvia con períodos de retorno de 2, 10, 20 y 50 años para evaluar el rendimiento de la infraestructura de drenaje. Como resultado se obtiene un diagrama de Pareto que representa el costo esperado en un año para todos los eventos de lluvia seleccionados según lo propuesto por Barreto (2012). CADE puede derivarse utilizando la ecuación 5.

$$\text{CADE} = \sum_{i=1}^{Tr-1} \left[\left(\frac{\text{Cost(i)}+\text{Cost(i+1)}}{2}\right) * \ (\text{Pi} - \text{P(i+1)})\right] * \text{f} \quad [5]$$

Donde Tr es el período de retorno, P es la probabilidad de excedencia (1/Tr) y *f* está dada por $f = (1+r)^N - 1 / r*(1+r)^N$. *f* es el factor de valor presente, *r* es la tasa de interés y N es la vida útil del sistema. El algoritmo NSGA-II se utilizó con el propósito de encontrar un conjunto representativo de soluciones óptimas de Pareto y cuantificar los intercambios en la satisfacción de los dos objetivos. Las simulaciones del modelo hidrodinámico 1D/2D se llevaron a cabo a través de computación en paralelo para mejorar la eficiencia computacional al simular cada evento de lluvia. Para el proceso de optimización, se tuvieron en cuenta como variables 51 tuberías sobrecargadas y 9 tanques de almacenamiento de acuerdo con el área disponible para su implementación.

En el presente trabajo se utilizan tres medidas de rehabilitación para evaluar sus efectos sobre la capacidad del sistema: (a) Renovación de las Tuberías (RT): se encontraron 19 diámetros de 51 tuberías con sobrecarga (es decir, cuando la relación entre el flujo máximo en el conducto y el área completa del conducto fue mayor que 0,99) y estas tuberías se identificaron como variables para la optimización. (b) Sistemas de Almacenamiento Distribuido (SAD): se seleccionaron nueve sitios posibles para tanques de almacenamiento en función de la disponibilidad de espacio y el rendimiento del sistema. Los tanques de almacenamiento se definen a través de una curva de elevación y almacenamiento con una profundidad máxima de 5 metros. La profundidad está gobernada por un vertedero y una regla de control. Esto se maneja dentro del código desarrollado para interactuar con el algoritmo de optimización. (c) Combinación de ambas medidas (RT+SAD).

CASO DE ESTUDIO

El caso de estudio comprende el área urbana de Segunbagicha ubicada en Dhaka, Bangladesh, el cual ha experimentado problemas frecuentes de inundaciones. El sistema tiene un área de drenaje de 8.3 km^2 e incluye las áreas de negocios y oficinas gubernamentales más importantes de la ciudad. Abarca 74 subcuencas, 88 conductos con una longitud total de 13.635 m, con una combinación de 75 tubos circulares con una longitud total de 11.308 m, y 13 box-culverts con una longitud total de 2.327 m. Los diámetros circulares de las tuberías de drenaje varían de 450 a 5.500 mm y los box-culverts varían entre 2,5 por 2 m y 5,5 por 4,3 m. La Figura. 2 muestra el diseño del sistema de drenaje local.

El sistema también incluye 88 nodos (uniones), dos estaciones de bombeo y 1 emisario final (outlet). Se estimó el grado de área impermeable de cada subcuenca y el tiempo de concentración total obtenido fue del orden de 20 minutos. El valor inicial de la infraestructura en dólares americanos para las medidas RT y SAD fue del orden de $ 44.6 y $ 17.3 millones, respectivamente. El monto del costo de rehabilitación inicial obtenido para la medida RT + SAD se estimó en $ 22.3 millones. El costo de daño inicial calculado sin implementar las medidas de rehabilitación para los eventos de lluvia de 2, 10, 20 y 50 años fueron de $ 3.7, $ 7.4, $ 9.2 y $ 11.8 millones respectivamente y se encontró que los CADE inicial también sin implementar las medidas de rehabilitación fueron de $ 46.6 millones.

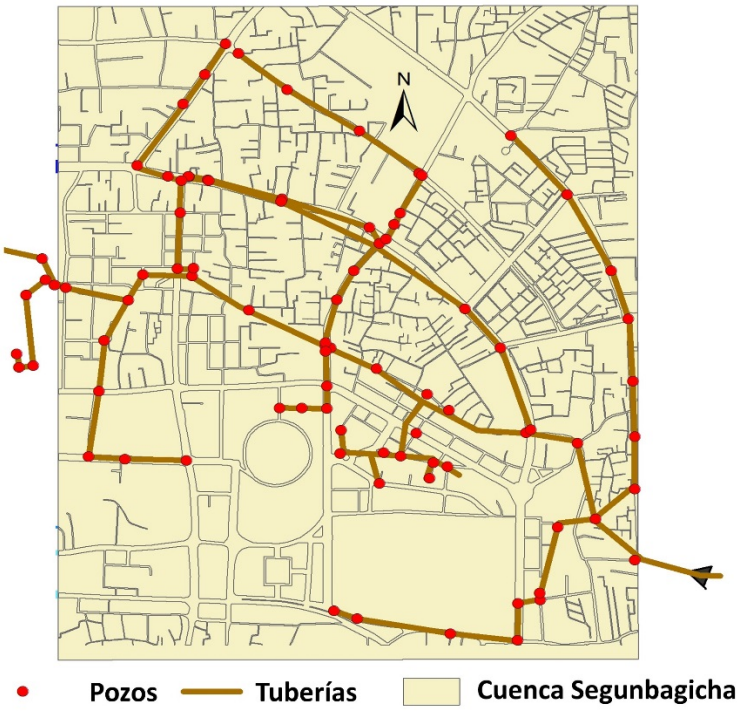


Figura 2.- Red de drenaje urbano.

RESULTADOS

Los parámetros de optimización del algoritmo NSGA-II para cada medida de rehabilitación y para los CADE se establecieron en un tamaño de población de 100 y 20 generaciones para un número total de evaluaciones de la función de 2.000. Las soluciones no dominadas obtenidas para las medidas de rehabilitación RT, SAD y RT+SAD se presentan en la Figura 3.

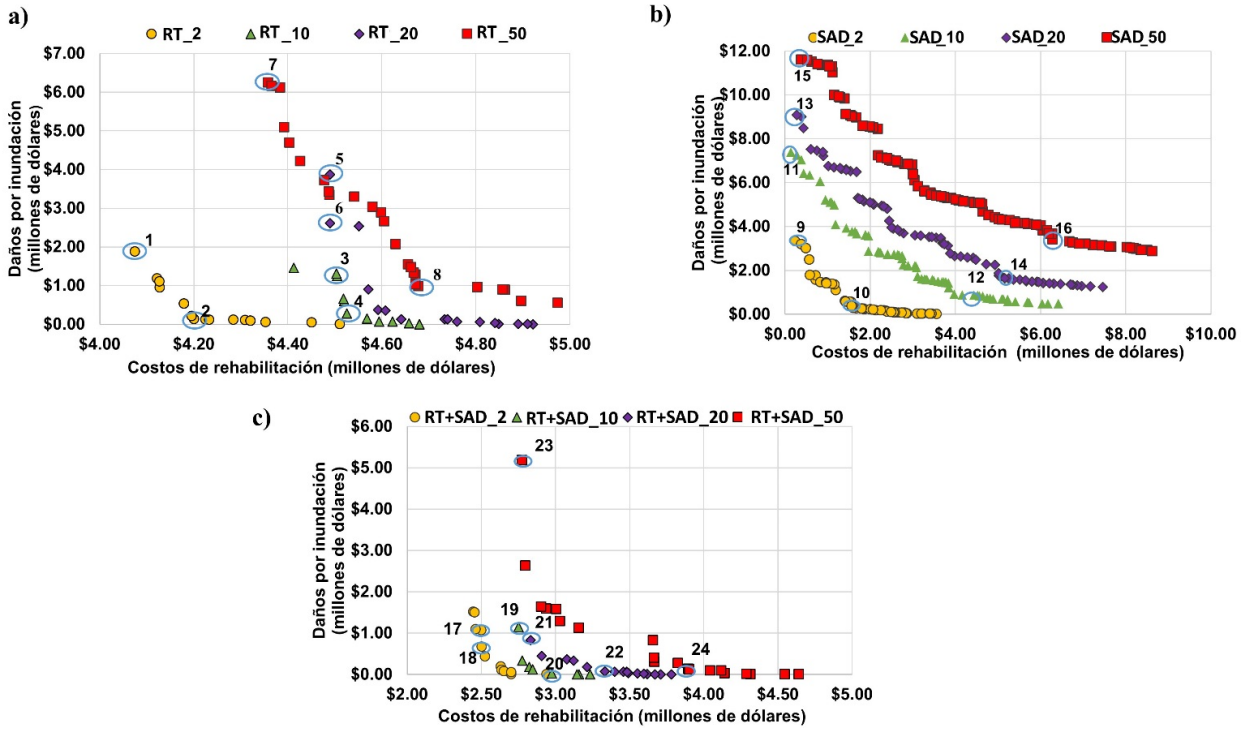


Figura 3.- Conjunto de Pareto óptimo para (a) RT, (b) SAD, (c) RT+SAD.

Los resultados de la Figura 3 indican que para diseños de eventos grandes (hasta 50 años), las medidas de rehabilitación RT serían una buena opción con una inversión mínima de $ 4.7 millones para minimizar el costo de daños por inundación a $ 1 millón (solución 8). Con la misma inversión, si se seleccionan eventos más pequeños (hasta 10 años), una medida SAD (solución 12) puede reducir el daño a $ 0.7 millones de dólares, indicando la importancia y eficiencia de la medida RT y la practicidad y economía de construir SAD a lo largo el área de captación urbana. Sin embargo, con las ubicaciones disponibles para implementar tanques de almacenamiento, no fue posible reducir las inundaciones a cero para un evento de lluvia de 20 o 50 años. Por lo tanto, esto sugiere que la medida SAD se vuelve menos efectiva después de cierta carga de lluvia y la reducción adicional de daños parece depender de su ubicación en lugar de su volumen.

Para este estudio de caso, al combinar las medidas propuestas (RT+SAD) para un evento de 50 años, se necesitaría una inversión de $ 3.9 millones para reducir el costo de daños a cero (solución 24); por otro lado, de acuerdo con las soluciones óptimas obtenidas, con una inversión de $ 4.9 millones, los daños pueden reducirse a $ 0.5 millones solo implementando la medida RT en esta cuenca urbana. La Figura 4 presenta las soluciones no dominadas al incluir los CADE, También muestra el Costo Total Esperado - CTE (daños + inversión) para las medidas.

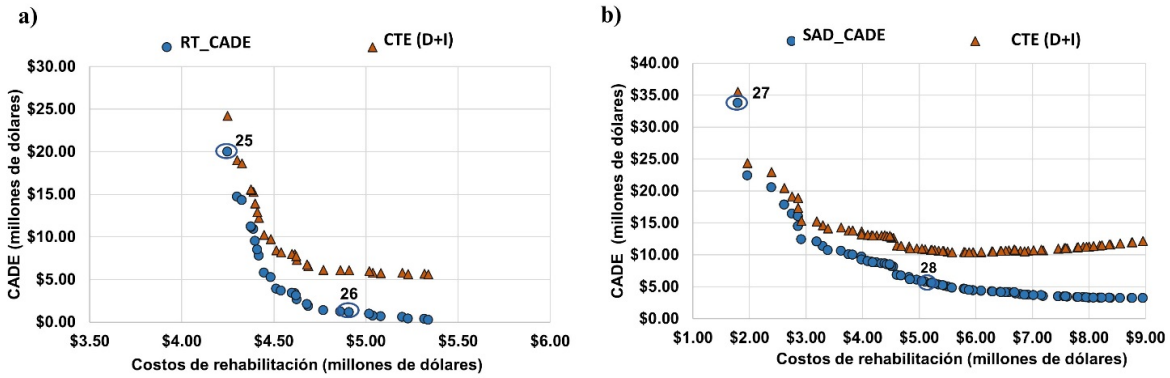


Figura 4.- Conjunto de Pareto óptimo para CADE.

En la Figura 4a se puede inferir que para RT se pueden esperar cero daños en un año al invertir $ 5.3 millones y el sistema no excederá su capacidad de drenaje para un evento de hasta 50 años. La curva CTE se obtiene a partir del costo total sumando los daños y los costos de inversión. La curva CTE indica un costo de daño máximo de $ 24 millones y un valor mínimo de $ 5,6 millones. Con la medida SAD (Figura 4b), también se pueden anticipar cero daños hasta aproximadamente un evento de 10 años con la misma inversión. Con lo anterior, una medida RT puede tener un efecto global en el control de inundaciones y una medida SAD puede ser localmente eficiente para reducir el riesgo de inundación. En la curva CTE, los resultados muestran un valor mínimo de $ 11.2 millones con una inversión de $ 5.0 millones. Los diagramas de Pareto de los CADE confirman la importancia de incluir los beneficios (costo reducido de rehabilitación) durante la vida útil del diseño.

CONCLUSIONES

El presente trabajo describe un enfoque novedoso para la evaluación de la capacidad de un sistema de drenaje que combina modelos 1D/2D con un algoritmo de optimización. Este enfoque propuesto se ha implementado en el código del entorno integrado EMBARCADERO Delphi y se ha demostrado en el estudio de caso real en Dhaka, Bangladesh. Se utilizaron tres medidas diferentes de rehabilitación sujetas a diferentes eventos de lluvia con el objetivo de minimizar los daños por inundación y los costos de rehabilitación. Se concluye que el cálculo de los costos de daños por inundación y costos de rehabilitación mediante la simulación numérica bidimensional, permite encontrar soluciones óptimas más realistas dependiendo de los objetivos de reducción a alcanzar. Esta evaluación también proporciona un marco prometedor y potencialmente rentable para mantener un rendimiento aceptable del SDU ante diferentes eventos de lluvia y de esta manera apuntar hacia una gestión del agua urbana más sostenible.

REFERENCIAS

Barreto, W. (2012). *Multi-objective optimization for urban drainage rehabilitation* CRC Press/Balkema ISBN 978-0-415-62478-7 Taylor&Francis group.

Deb, K., Pratap, A., Agarwall, A., Meyarivan, T. (2002). "A Fast and Elitist Multi-objective Genetic Algorithm". *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 6(2), 2002 pp. 182-197.

Diao, K., Sweetapple, C., Farmani, R., Fu, G., Ward, S. (2016). "Global resilience analysis of water distribution systems". *Water Research Journal* 106:383-393. doi.org/10.1016/j.watres.2016.10.011.

Martínez, C., Beheshtah, T., Sanchez, A., Vojinović, Z. (2014-a). "Flood Resilience Assessment in urban drainage systems through multi-objective optimisation". *International Conference on Hydroinformatics 2014*, New York, 17-21. CUNY Academic Works. http://academicworks.cuny.edu/cc_conf_hic/236.

IAHR **AIIH**

XXVIII CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA
BUENOS AIRES, ARGENTINA, SEPTIEMBRE DE 2018

OPTIMIZACIÓN DE LOS RECURSOS HÍDRICOS DE UN SISTEMA DE LLANURA. CASO DE ESTUDIO BAÑADO LA ESTRELLA (FORMOSA)

María Alejandra Cristanchi[1], Rosana Hämmerly[2], Miguel Ángel Valiente[3]

[1] Dirección Ejecutiva Comisión Trinacional río Pilcomayo, [2] Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas (FICH-UNL), [3] Facultad de Ingeniería (UNNE) - Argentina
Formosa (3600) - (+54 9) 3704-664974
alejandracristanchi@yahoo.com.ar, alejandracristanchi@gmail.com

RESUMEN:

La provincia de Formosa cuenta con abundantes recursos hídricos superficiales. Las lluvias y caudales de los cursos de agua presentan una variabilidad temporal significativa, dando lugar a una alternancia de períodos húmeros y secos y a la ocurrencia de crecidas y estiajes severos. Esta alternancia natural de exceso y déficit condicionan las actividades económicas y de desarrollo en los centros urbanos y rurales, debido a que la infraestructura de la región no está adaptada suficientemente a la variabilidad. Dicha situación lleva a plantear la necesidad de mejorar la capacidad de regulación de las lagunas y bañados por medio de nuevas obras y de optimizar la operación de éstas.

En el presente trabajo se optimizan los recursos hídricos de un sistema de llanura mediante un modelo de Soporte de Decisión MIKE BASIN, adoptando como caso de estudio el bañado La Estrella, siendo uno de los cuerpos de agua más importantes de la provincia de Formosa. Se analiza en particular para la modelación las principales obras del Complejo Hidrovial RP (Ruta Provincial) Nº 28 y demandas en cinco localidades que son beneficiarias directas de las aguas del bañado, el período de estudio es 2005/2006 a 2010/2011.

ABSTRACT:

The province of Formosa has abundant surface water resources. The rains and flows of the water courses present a significant temporal variability, giving rise to an alternation of humid and dry periods and to the occurrence of severe floods and droughts. This natural alternation of excess and deficit conditions economic and development activities in urban and rural centers, because the infrastructure of the region is not sufficiently adapted to variability. This situation leads to the need to improve the regulation capacity of lagoons and bathed by means of new works and to optimize their operation.

In the present work, the water resources of a plain system are optimized by means of a decision support model MIKE BASIN, adopting as a case study La Estrella, being one of the most important water bodies in the province of Formosa. The main works of the Complejo Hidrovial RP (Provincial Route) Nº 28 and demands in five localities that are direct beneficiaries of the waters of the bathed, are analyzed in particular for the modeling, the study period is 2005/2006 to 2010/2011.

PALABRAS CLAVES: optimización; MIKE BASIN; bañado La Estrella

INTRODUCCIÓN

Los problemas relativos al agua reflejan las dificultades que enfrenta el mundo. En el último informe de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el Mundo se afirma que *"el agua representa el único medio por el cual las grandes crisis globales (alimentaria, energética, económica, cambio climático) se pueden abordar conjuntamente"*. (ONU, 2015).

La utilización racional del agua implica una gestión sostenible, eficiente e integral de los recursos hídricos. A veces para lograr estos objetivos es necesario utilizar herramientas tecnológicas que permitan analizar los sistemas de manera integrada abordando incertidumbres como ser el uso y la demanda, y dando como resultado soluciones óptimas que permitan lograr el equilibrio entre la oferta y la demanda.

La herramienta computacional a aplicar en este trabajo es el Sistema de Soporte de Decisión (SSD) MIKE BASIN (2008) desarrollado por el Instituto Hidráulico Danés en Hørsholm (Dinamarca), es un modelo de gestión integrada de los recursos hídricos y permite la representación matemática de la cuenca donde existen aprovechamientos hídricos, incluyendo río principal y sus tributarios, hidrología de la cuenca en tiempo y espacio, demanda de agua de los usuarios de la cuenca. El modelo representa el sistema hídrico como una red formada por ramas (tramos individuales de ríos o canales) y nodos (confluencias, poblaciones, centrales de riego). La red es digitalizada en ArcGIS, del que MIKE BASIN actúa como extensión. Una de las principales características del modelo radica en la posibilidad de ejecutar no sólo tareas de simulación (muy habituales en la mayoría de los modelos matemáticos de aplicación en recursos hídricos), sino que además permite realizar desarrollos de optimización dirigidos a alcanzar una función objetivo que dependerá del esquema planteado en la aplicación de un determinado caso. El modelo está concebido para hallar soluciones estacionarias a cada paso de tiempo, dando como resultado la cantidad de agua requerida para satisfacer la demanda de los usuarios. En cada paso de tiempo realiza un balance de entrada y salida en cada nodo de la red de acuerdo a las reglas fijadas por el proyectista. Los SSD son sistemas informáticos que ayudan en el proceso de toma de decisiones, esta toma implica el apoyo a la estimación, evaluación y/o comparación de alternativas, valiéndose de conocimientos en informáticas, ingeniería y gerenciamiento.

A pesar de la transcendencia del tema, hasta el momento no se habían encarado estudios referentes a la optimización de los recursos hídricos en la zona de estudio, lo cual constituía una asignatura pendiente.

En el presente trabajo se presenta una evaluación del estado actual y funcionamiento del sistema hídrico bañado La Estrella, resultando de gran interés la implementación de un SSD que permita optimizar los recursos hídricos a través de nuevas obras y de políticas de operación.

OBJETIVOS

- Evaluar la variación espacio-temporal de los déficits hídricos del sistema con las obras de regulación existentes, para un período plurianual de referencia incluyendo eventos de crecida y de estiaje
- Establecer políticas de operación del sistema con nuevas obras de regulación propuestas para el período de referencia y demandas futuras, proyectadas a un incremento de la población de 20 años.

DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

La provincia de Formosa cuenta con abundantes recursos hídricos superficiales como los ríos Bermejo, Paraguay y Pilcomayo, grandes lagunas, bañados y riachos menores, como el bañado La Estrella, embalse Laguna Yema, laguna La Salada, estero Bellaco.

Las lluvias y caudales de los cursos de agua presentan una variabilidad temporal significativa, dando lugar a una alternancia de períodos húmedos y secos y a la ocurrencia de crecidas y estiajes severos.

Esta alternancia natural de exceso y déficit condicionan las actividades económicas y de desarrollo en los centros urbanos y rurales, debido a que la infraestructura de la región no está adaptada suficientemente a la variabilidad. Esta situación lleva a plantear la necesidad de mejorar la capacidad de regulación actual de las lagunas y bañados por medio de nuevas obras o de optimizar la operación de éstas.

Estos problemas llevan a pensar en la necesidad de un manejo óptimo y racional de los recursos hídricos, en este caso a través de la implementación de un SSD que permita obtener las mejores alternativas y resultados del sistema hídrico del bañado La Estrella con las obras existentes, nuevas obras y políticas de operación de las mismas, de manera que la alternancia natural entre exceso y déficit sea mínima.

ZONA DE ESTUDIO: DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

La zona elegida para el desarrollo del trabajo es de interés social, económico y en el manejo de los recursos hídricos ya que constituye una de las reservas más importante de agua superficial de la provincia de Formosa.

En el trabajo se analiza, en particular para la modelación el Embalse RP Nº 28, canal derivador sur, obra partidora, canales Monte Lindo y Las Lomitas y las localidades de Las Lomitas, Pozo del Tigre, Estanislao del Campo, Ibarreta y Comandante Fontana beneficiarias directas de las aguas del bañado a través de los canales mencionados.

El bañado La Estrella, tercer humedal más grande de Sudamérica, junto al gran Pantanal y los esteros del Iberá (Fundación ProYungas, 2010), representa la continuidad del río Pilcomayo en la República Argentina, en especial en la provincia de Formosa, desde su zona de atarquinamiento en las proximidades de Misión La Paz (Salta) hasta la cercanías de su desembocadura en el río Paraguay a través de distintos riachos, esteros y canales.

Se encuentra en el sector centro – norte de la provincia de Formosa a 50 km de la localidad de Las Lomitas. Tiene una longitud de 350 km, con un ancho medio de 10 a 12 km, su extensión geográfica de 400.000 has aproximadamente (Lagranja, 2004).

Dentro del bañado La Estrella, se encuentra el Complejo Hidrovial RP Nº 28, el objetivo principal de la construcción de este gran embalse de llanura fue el de generar un reservorio que almacene parte de los excesos del bañado que se producen cíclicamente todos los años a través de los pulsos hídricos en el escurrimiento y proporcionar una fuente de abastecimiento artificial a las poblaciones y emprendimientos locales en momentos en que los aportes del bañado cesan, ya sea por la interrupción o disminución de los caudales que trae el río Pilcomayo (principal aporte hídrico al sistema) desde Bolivia.

Este complejo cuenta con un sistema de obras hidráulicas como alcantarillas, vertederos y canales derivadores que alimentan a localidades y colonias de productores a través de la reactivación de algunos cauces antiguos de ríos y riachos. Las localidades cuentan con algunas represas y/o embalses donde se almacena el agua proveniente del bañado La Estrella. El uso principal de estas aguas es para consumo humano y en segundo lugar para agricultura y ganadería.

El bañado La Estrella en cuanto al ambiente fluvio-lacustre permite la formación de un microclima propio que se inserta como cuña subtropical en el clima semiárido de la región centro oeste de la provincia, generando en su extenso territorio una vegetación característica de las zonas subtropicales húmedas, con bosques de alisos que colonizan bancos de arena o áreas de derrame fluvial (Gobierno de la provincia de Formosa, 2000).

En cuanto a la flora y fauna se destaca la existencia de bosques altos y bajos. El primero conformado por algarrobo blanco y negro, quebracho colorado, mistol y palo blanco; en cuanto al bosque bajo se forma con chañar, duraznillo, vinal. También es característica la presencia de

vegetación acuática como totora, pirí, repollito de agua. Los exponentes más significativos en cuanto a la fauna son garza blanca, cigüeña, ñandú, chajá, oso hormiguero, yacaré (Fundación ProYungas, 2010).

Las funciones ecológicas que cumple el bañado le otorgan un carácter de elevada productividad, generando muchos beneficios para el hombre; siendo las principales actividades que se desarrollan en la zona la ganadería, agricultura, explotación forestal, caza y pesca (www.banadolaestrella.org.ar).

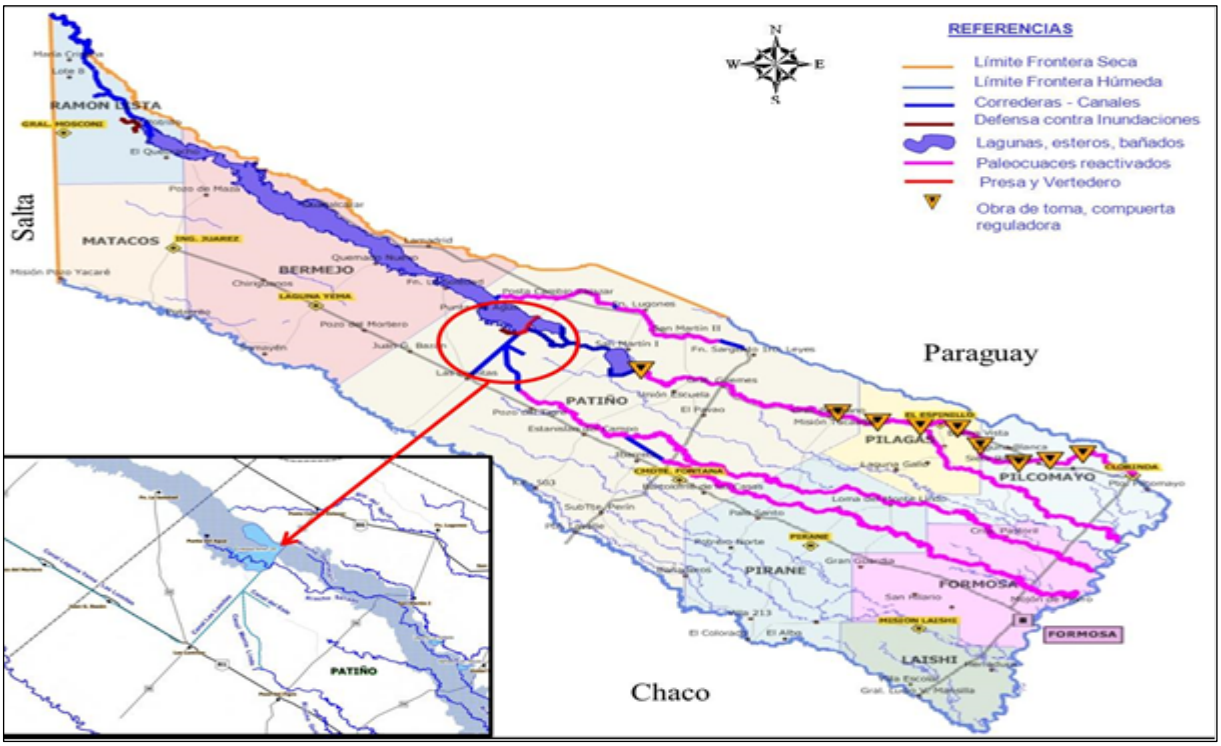


Figura 1.- Ubicación del bañado La Estrella en territorio provincial – detalle Complejo Hidrovial RP Nº 28 (Fuente Unidad Provincial Coordinador del Agua).

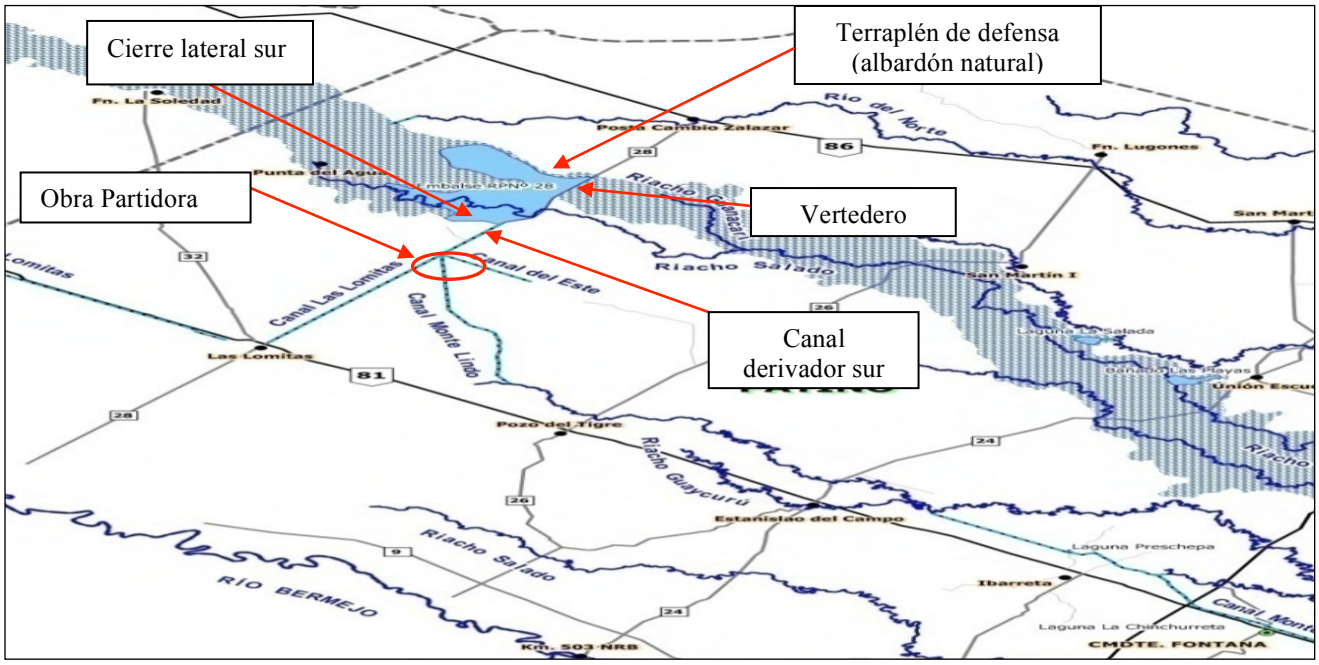


Figura 2.- Obras Complejo Hidrovial RP Nº 28 (Fuente Unidad Provincial Coordinador del Agua).

ESCENARIOS IMPLEMENTADOS

La implementación del modelo MIKE BASIN permitió la evaluación de tres escenarios posibles. Para cada uno de estos escenarios el objetivo fue el de optimizar los recursos hídricos del sistema del bañado La Estrella. Mediante el análisis de los resultados se establecieron políticas de operación del sistema.

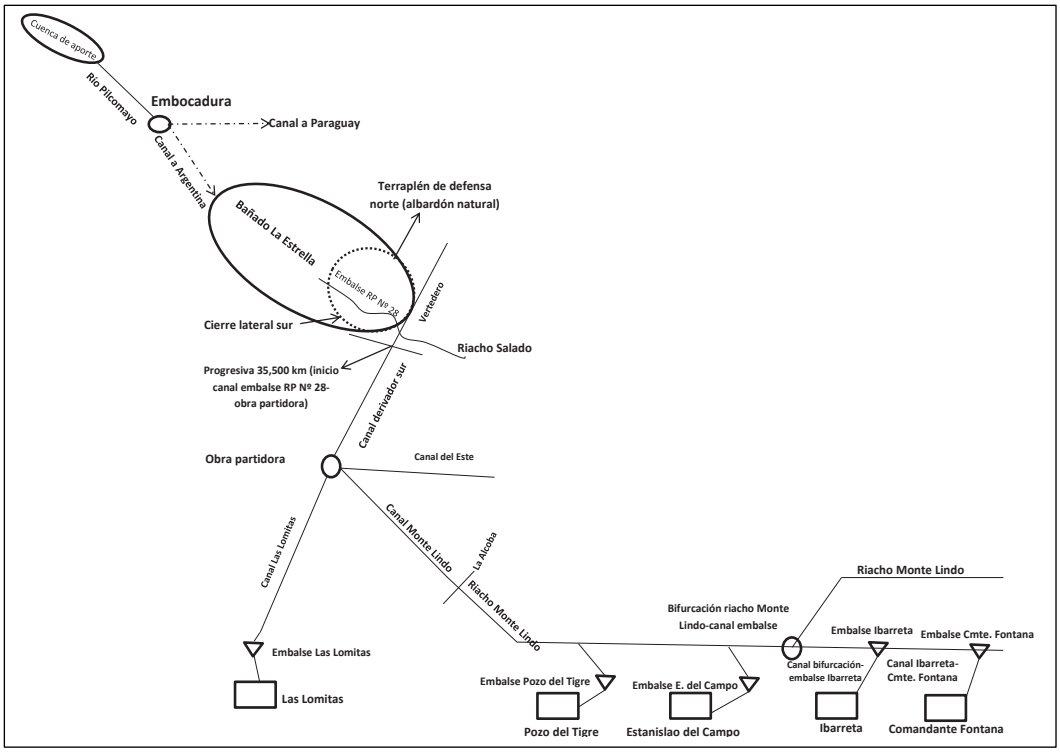


Figura 3.- Esquema de funcionamiento sistema bañado La Estrella.

En relación a las modelaciones se combinaron para cada escenario, demandas con sistemas de funcionamiento. En este sentido las combinaciones posibles resultaron en tres escenarios:

- Demanda actual con el sistema de obras existentes
- Demanda actual con un sistema donde se proponen nuevas obras de corto plazo de ejecución, como máximo 2 años y baja inversión
- Demanda futura con un sistema donde se proponen nuevas obras que alcancen a cubrir la demanda futura. En este sentido serán obras con un plazo de ejecución de 10 años ya que las mismas serán de mayor envergadura y por ende mayor inversión a las propuestas para la demanda actual a corto plazo

Los escenarios resultantes de estas combinaciones se explican a continuación:

- **Escenario actual:** este escenario contempla el sistema de obras de regulación existente y demandas actuales, para el período de referencia mencionado. Se analizaron en este escenario la capacidad que tiene el sistema de obras en funcionamiento de satisfacer la demanda actual
- **Escenario optimizado a corto plazo:** al escenario se lo denomina optimizado en el sentido del sistema de obras, ya que se mejora el sistema actual proponiendo nuevas obras de regulación para las condiciones hidrológicas del período de referencia y considerando la demanda de agua actual. Se realizaron corridas de optimización del modelo con los nuevos esquemas propuestos

Las nuevas obras son propuestas donde la demanda no alcanza a ser cubierta por la oferta actual. Estas consisten en nuevas obras o la ampliación de las ya existentes

- **Escenario optimizado a largo plazo:** también se considera optimizado desde el punto de vista del sistema de obras propuesto. Se consideró en este escenario una demanda con un incremento de la población a 20 años y con ello nuevas obras para satisfacer esta demanda futura. El plazo de ejecución y de inversión económica será mayor al escenario anterior

METODOLOGÍA APLICADA

La implementación del modelo MIKE BASIN permitió la evaluación de los tres escenarios descriptos anteriormente. Para cada uno de estos escenarios el objetivo fue el de optimizar los recursos hídricos del sistema del bañado La Estrella.

La información utilizada para la implementación del modelo fueron: de obras existentes, planialtimétrica, meteorológica e hidrológica (caudales diarios, niveles diarios, aforos, precipitaciones diarias). Sobre la base del conocimiento del funcionamiento del sistema físico, la información recopilada y previamente procesada y los escenarios que se pretenden analizar, se implementó el modelo.

La información de entrada al modelo consiste en una serie de tiempo de oferta y demanda para cada fuente de acuerdo a sus correspondientes asignaciones. La simulación se realizó para un período plurianual de referencia comprendido entre los años 2005/2006 – 2010/2011, coincidiendo el inicio de la simulación con el inicio del año hidrológico, desde 1 de septiembre al 31 de agosto.

Cada obra se analiza individualmente, como así también las localidades donde se incluye un análisis de oferta, demanda y prioridades de extracción asignadas a cada usuario. A pesar de la complejidad del comportamiento hidráulico del sistema bañado La Estrella y frente a la escasez de información necesaria para incorporar al modelo, se logró una representación adecuada del sistema y los resultados obtenidos de la implementación fueron satisfactorios.

La elaboración del esquema topológico para la aplicación del modelo, es una representación simplificada del sistema físico. Se digitalizaron los diferentes componentes del sistema como ser cuencas, embalses, poblaciones, canales principales y secundarios

No se realizó la calibración del modelo, debido a que no se cuenta con información en cantidad y calidad para realizar dicho proceso. Los resultados de las corridas generadas por el modelo fueron contrarrestados y verificados con imágenes satelitales y con el conocimiento de los lugareños sobre el funcionamiento del sistema del bañado La Estrella.

Los coeficientes de evaluación de la performance del modelo utilizados fueron: Eficiencia de Nash-Sutcliffe (Ef), Error relativo de volumen (ErV) y Error relativo de caudal (ErQM).

MEDIDAS PROPUESTAS

Muchos de los problemas estructurales y de asignación del recurso encuentran solución a través de esta modelación. Se ponen a disposición una serie de acciones estructurales y no estructurales que permiten la optimización del sistema hídrico del bañado La Estrella.

En la Tabla 1 se presentan las medidas propuestas para los escenarios analizados.

Tabla 1.- Medidas propuestas.

Medidas	Localización	Escenario optimizado a corto plazo	Escenario optimizado a largo plazo
Estructurales	Las Lomitas	Canal de conexión canal Las Lomitas – planta de agua potable	Se mantiene el canal de conexión y se incrementan las dimensiones del embalse
	Pozo del Tigre	Canal de conexión riacho Monte Lindo planta de agua potable	Ídem escenario optimizado a corto plazo
	Estanislao del Campo	Canal de conexión riacho Monte Lindo – planta de agua potable	Se mantiene el canal de conexión y se incrementan las dimensiones del embalse
	Ibarreta	En el año 2011 se incrementó la capacidad de almacenamiento del embalse, con esta medida se satisface la demanda	Ídem escenario optimizado a corto plazo
	Comandante Fontana	Canal de conexión riacho Monte Lindo – planta de agua potable	Ídem escenario optimizado a corto plazo
	Canal derivador sur - Monte Lindo – Las Lomitas		Modificación de sección, pendiente. En el canal Monte Lindo reemplazo obras de arte existentes.
No estructurales			Aplicación del Código de Aguas. Cumplimiento de las leyes de dominio púbico en el bañado La Estrella. Incremento de la población a 20 años en todas las localidades

PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

A continuación se presentan los resultados del modelo para los escenarios implementados.

Embalse RP Nº 28

La Tabla 2 muestra los resultados del Embalse RP Nº 28 para los tres escenarios analizados.

Tabla 2.- Embalse RP Nº 28.

	Escenario actual	Escenario optimizado a corto plazo	Escenario optimizado a largo plazo
Volumen Embalse RP Nº 28	40.887 hm^3	Ídem escenario actual	40.887 hm^3
Volumen que pasa por vertedero	29.248 hm^3	Ídem escenario actual	27.109 hm^3
Caudal máximo calculado sobre vertedero	1.296 m^3/s	Ídem escenario actual	1.296 m^3/s
Caudal máximo simulado sobre vertedero	1.370 m^3/s	Ídem escenario actual	1.362 m^3/s
Máxima capacidad de almacenamiento (fecha)	Modelo= 23-01-2006. Valiente *et al*. (2009)= segunda quincena del mes de febrero Diferencia de 15 a 25 días.	Ídem escenario actual	Ídem escenario actual
Porcentaje de volumen utilizado	Solamente el 2,5% del volumen total del embalse es utilizado para abastecer a las localidades a través del canal Las Lomitas, canal y riacho Monte Lindo.	Ídem escenario actual	Solamente el 8% del volumen total del embalse se utilizará para abastecer a las localidades a través del canal Las Lomitas, canal y riacho Monte Lindo.

Obra partidora

La Tabla 3 muestra los resultados de la obra partidora para los tres escenarios analizados.

Tabla 3.- Obra partidora.

	Escenario actual	Escenario optimizado a corto plazo	Escenario optimizado a largo plazo
Tiempo de tránsito del hidrograma	10 días (desde Embalse RP Nº 28 hasta la obra partidora)	Ídem escenario actual	5 días (desde Embalse RP Nº 28 hasta la obra partidora)
Volumen progresiva 35,500 km (inicio canal Embalse RP Nº 28 – obra partidora)	756 hm^3	Ídem escenario actual	3.347 hm^3
Volumen obra partidora	713 hm^3	Ídem escenario actual	3.169 hm^3
Caudal máximo progresiva 35,500 km (inicio canal Embalse RP Nº 28 – obra partidora)	11,1 m^3/s	Ídem escenario actual	30 m^3/s
Caudal obra partidora	10,14 m^3/s	Ídem escenario actual	28,5 m^3/s
Porcentaje de distribución de caudales	Canal Monte Lindo= 70% Canal del Este= 28% Canal Las Lomitas= 2%	Ídem escenario actual	Canal Monte Lindo= 70% Canal del Este= 25% Canal Las Lomitas= 5%

Canal Las Lomitas

La Tabla 4 muestra los resultados del canal Las Lomitas para los tres escenarios analizados.

Tabla 4.- Canal Las Lomitas.

	Escenario actual	Escenario optimizado a corto plazo	Escenario optimizado a largo plazo
Tiempo de tránsito del hidrograma	15 días (desde obra partidora al embalse Las Lomitas)	Ídem escenario actual	4 días (desde obra partidora al embalse Las Lomitas)
Volumen obra partidora – canal Las Lomitas	14,3 hm^3	Ídem escenario actual	158 hm^3
Volumen Las Lomitas	13,4 hm^3	Ídem escenario actual	150 hm^3
Caudal máximo obra partidora-canal Las Lomitas	0,20 m^3/s	Ídem escenario actual	1,40 m^3/s
Caudal máximo embalse Las Lomitas	0,17 m^3/s	Ídem escenario actual	1,35 m^3/s

Las Lomitas

La Tabla 5 muestra los resultados de la localidad de Las Lomitas para los tres escenarios analizados.

Tabla 5.- Las Lomitas.

	Escenario actual	Escenario optimizado a corto plazo	Escenario optimizado a largo plazo
Embalse	Capacidad máxima de almacenamiento = 0,206 hm^3	Ídem escenario actual	Capacidad máxima de almacenamiento = 0,893 hm^3
	De junio a noviembre trabaja al 100% de su capacidad máxima de almacenamiento. El almacenamiento disminuye a partir de diciembre hasta mediados de abril. Desde febrero a fines de marzo es 0%.	La conexión canal Las Lomitas-planta de agua potable y la capacidad del embalse no son suficientes para abastecer a la población.	De abril a diciembre trabaja al 100% de su capacidad máxima de almacenamiento. La capacidad del embalse nunca llegaría a ser igual a la mínima capacidad operable. Durante la segunda mitad del mes de

	A partir del mes de abril se reinicia la recarga al embalse.		diciembre hasta finales de febrero se abastece a la población con agua del embalse. El resto del año se abastece a la población con el agua canal Las Lomitas-planta de agua potable.
Población	Déficit de la demanda o meses más críticos desde enero a marzo.	Déficit de la demanda o meses más críticos desde enero a marzo	No existe déficit de la demanda.

Obra partidora – canal Monte Lindo – toma Pozo del Tigre

La Tabla 6 muestra los resultados de obra partidora – canal Monte Lindo – toma Pozo del Tigre para los tres escenarios analizados.

Tabla 6.- Obra partidora – canal Monte Lindo – toma Pozo del Tigre.

	Escenario actual	Escenario optimizado a corto plazo	Escenario optimizado a largo plazo
Tiempo de tránsito del hidrograma	4 días (desde obra partidora hasta la toma de Pozo del Tigre)	Ídem escenario actual	2 días (desde obra partidora hasta la toma de Pozo del Tigre)
Volumen obra partidora – canal Monte Lindo	489 hm^3	Ídem escenario actual	2.107 hm^3
Volumen toma Pozo del Tigre	463 hm^3	Ídem escenario actual	1.994 hm^3
Caudal máximo obra partidora-toma Pozo del Tigre	6,96 m^3/s	Ídem escenario actual	18,95 m^3/s
Caudal máximo toma de Pozo del Tigre	6,48 m^3/s	Ídem escenario actual	17,97 m^3/s

Pozo del Tigre

La Tabla 7 muestra los resultados de la localidad de Pozo del Tigre para los tres escenarios analizados.

Tabla 7.- Pozo del Tigre.

	Escenario actual	Escenario optimizado a corto plazo	Escenario optimizado a largo plazo
Embalse	Capacidad máxima de almacenamiento = 0,35 hm^3	Ídem escenario actual	Ídem escenario actual
	De junio a octubre trabaja al 100% de su capacidad máxima de almacenamiento. El almacenamiento disminuye a partir de noviembre hasta mediados de abril. Siendo los meses más críticos febrero y marzo, en este último mes el almacenamiento es 0%. A partir del mes de abril se reinicia la recarga al embalse.	De junio a diciembre trabaja al 100% de su máxima capacidad de almacenamiento. La capacidad del embalse nunca llegaría a ser igual a la mínima capacidad operable. Durante los meses de enero y febrero se abastece a la población con agua del embalse. El resto del año la población se abastece directamente con agua del riacho Monte Lindo a través del canal de conexión riacho Monte Lindo-planta de agua potable.	De abril a diciembre trabaja al 100% de su capacidad máxima de almacenamiento. Durante los meses de enero y febrero se abastece a la población con agua del embalse. El resto del año la población se abastece directamente con agua del riacho Monte Lindo a través del canal de conexión riacho Monte Lindo – planta de agua potable.
Población	Déficit de la demanda o meses más críticos desde febrero a marzo.	No existe déficit de la demanda o meses críticos.	No existe déficit de la demanda o meses críticos.

Estanislao del Campo

La Tabla 8 muestra los resultados de la localidad de Estanislao del Campo para los tres escenarios analizados.

Tabla 8.- Estanislao del Campo.

	Escenario actual	Escenario optimizado a corto plazo	Escenario optimizado a largo plazo
Tiempo de tránsito del hidrograma	4 días (desde Pozo del Tigre hasta la toma de Estanislao del Campo)	Ídem escenario actual	Ídem escenario actual
Volumen Pozo del Tigre	452 hm^3	No se modeló	1.954 hm^3
Volumen toma Estanislao del Campo	430 hm^3	No se modeló	1.847 hm^3
Caudal máximo Pozo del Tigre	6,36 m^3/s	No se modeló	17,61 m^3/s
Caudal máximo toma Estanislao del Campo	5,95 m^3/s	No se modeló	16,70 m^3/s
Embalse	Capacidad máxima de almacenamiento = 0,049 hm^3 De mayo a octubre trabaja al 100% de su capacidad máxima de almacenamiento. El almacenamiento disminuye a partir de noviembre hasta mediados de abril siendo los meses más críticos desde diciembre a mediados de abril, meses donde el almacenamiento relativo es 0%. A partir del mes de abril se reinicia la recarga al embalse.	Capacidad máxima de almacenamiento = 0,102 hm^3 Las nuevas dimensiones del embalse y el canal de conexión riacho Monte Lindo-planta de agua potable no satisfacen la demanda.	Capacidad máxima de almacenamiento = 0,253 hm^3 De abril a enero trabaja al 100% de su capacidad máxima de almacenamiento. La capacidad del embalse nunca llegaría a ser igual a la mínima capacidad operable. Durante el mes de febrero hasta los primeros días de marzo se abastece a la población con agua del embalse. El resto del año la población se abastece directamente con agua del riacho Monte Lindo a través del canal de conexión riacho Monte Lindo-planta de agua potable.
Población	Déficit de la demanda o meses más críticos de diciembre a marzo.	Déficit de la demanda o meses más críticos de enero a marzo.	No existe déficit de la demanda o meses críticos.

Ibarreta

La Tabla 9 muestra los resultados de la localidad de Ibarreta para los tres escenarios analizados.

Tabla 9.- Ibarreta.

	Escenario actual	Escenario optimizado a corto plazo	Escenario optimizado a largo plazo
Volumen Estanislao del Campo	422 hm^3	No se modeló	1.810 hm^3
Volumen bifurcación riacho Monte Lindo – canal embalse Ibarreta.	400 hm^3	No se modeló	1.717 hm^3
Caudal máximo Estanislao del Campo	5,83 m^3/s	No se modeló	16,37 m^3/s
Caudal máximo bifurcación riacho Monte	5,48 m^3/s	No se modeló	15,55 m^3/s

Lindo – canal embalse Ibarreta			
Volumen bifurcación riacho Monte Lindo – canal embalse Ibarreta	20 hm^3	No se modeló	86 hm^3
Volumen embalse Ibarreta	19 hm^3	No se modeló	81 hm^3
Caudal máximo bifurcación riacho Monte Lindo- canal embalse Ibarreta	0,27 m^3/s	No se modeló	0,78 m^3/s
Caudal máximo embalse Ibarreta	0,26 m^3/s	No se modeló	0,74 m^3/s
Embalse	Capacidad máxima de almacenamiento = 0,673 hm^3	Capacidad máxima de almacenamiento = 1,539 hm^3	Ídem escenario optimizado a corto plazo
	De junio a noviembre trabaja al 100% de su máxima capacidad de almacenamiento. El almacenamiento disminuye a partir del mes de diciembre hasta mediados de abril. Siendo los meses más críticos febrero y marzo, en este último mes el almacenamiento es 0%. A partir del mes de abril se reinicia la recarga al embalse.	De julio a noviembre trabaja al 100% de su capacidad máxima de almacenamiento. La capacidad del embalse nunca llegaría a ser igual a la mínima capacidad operable.	De mayo a enero trabaja al 100% de su capacidad máxima de almacenamiento. La capacidad del embalse nunca llegaría a ser igual a la mínima capacidad operable.
Población	Déficit de la demanda o meses más críticos de febrero a marzo.	No existe déficit de la demanda o meses críticos.	No existe déficit de la demanda o meses críticos.

Comandante Fontana

La Tabla 10 muestra los resultados de la localidad de Comandante Fontana palos escenarios analizados.

Tabla 10.- Comandante Fontana.

	Escenario actual	Escenario optimizado a corto plazo	Escenario optimizado a largo plazo
Volumen embalse Ibarreta	8 hm^3	No se modeló	65 hm^3
Volumen embalse Comandante Fontana	7,2 hm^3	No se modeló	58 hm^3
Caudal máximo Ibarreta	0,20 m^3/s	No se modeló	0,67 m^3/s
Caudal máximo que llega al embalse Comandante Fontana	0,18 m^3/s	No se modeló	0,61 m^3/s
Embalse	Capacidad máxima de almacenamiento = 0,294 hm^3	Capacidad máxima de almacenamiento = 0,735 hm^3	Ídem escenario optimizado a corto plazo
	De julio a noviembre trabaja al 100% de su capacidad máxima de almacenamiento. El almacenamiento disminuye a partir de noviembre hasta mediados de mayo. Siendo los meses más críticos desde diciembre hasta	De julio a octubre trabaja al 100% su capacidad máxima de almacenamiento. Durante los meses de enero y febrero se abastece a la población con agua del embalse. El resto del año la población se abastece	De mayo a enero trabaja al 100% de su capacidad máxima de almacenamiento. La capacidad del embalse nunca llegaría a ser igual a la mínima capacidad operable. Durante el mes de febrero se

	mayo, en estos meses el almacenamiento es 0%. A fines de mayo se reinicia la recarga del embalse.	directamente con agua del riacho Monte Lindo a través del canal de conexión riacho Monte Lindo-planta de agua potable.	abastece a la población con agua del embalse. El resto del año la población se abastece directamente con agua del riacho Monte Lindo a través del canal de conexión riacho Monte Lindo – planta de agua potable.
Población	Déficit de la demanda o meses más críticos son desde diciembre a mayo.	En la mayor parte del tiempo se satisface la demanda. Alternativa de solución a largo plazo para el mes de febrero.	No existe déficit de la demanda o meses críticos.

CONCLUSIONES Y CONSIDERACIONES FINALES

- Se destaca con este trabajo el uso de un modelo matemático para representar un sistema de bañado, implementando diversos escenarios y cuyos resultados permiten la planificación en el uso y control de los recursos hídricos
- Los resultados de los diferentes escenarios ponen de manifiesto la urgente necesidad de realizar una planificación del manejo racional del bañado La Estrella, mediante medidas estructurales y no estructurales. Esto permitirá disminuir el déficit de la demanda, optimizando el uso de una valiosa fuente de agua como lo es dicho sistema
- Se destaca la necesidad de mejorar la adquisición de datos del bañado La Estrella para evitar adoptar consideraciones o hipótesis para la representación del sistema en el modelo. En la medida que se disponga de nuevos aforos; relevamientos de sección transversales de canales de conducción; batimetría de cuerpos de agua; identificación de características técnicas de las obras de compuertas, vertederos, estaciones de bombeo; se podrá enriquecer la calidad de la información disponible y con ello la efectividad del modelo utilizado.
- Con la modelación se obtuvo información valiosa para la asignación de agua, como ser la necesidad de una planificación en el manejo racional del sistema bañado La Estrella, medidas estructurales y no estructurales que permitan disminuir el déficit de la demanda y optimizar el uso de esta valiente fuente de agua como lo es dicho sistema.
- Se demuestra que mediante la ampliación y mejora de la infraestructura existente se cubre la demanda de agua en las cinco localidades de estudio, logrando su abastecimiento durante todo el año
- Se recomiendo que la implementación de este modelo sirva de base para futuros estudios en áreas de la provincia de similares características, como por ejemplo el embalse Laguna Yema y laguna La Salada.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Cristanchi M. A., Hämmerly R., Valiente M. A. (2015). "Optimización de los recursos hídricos de un sistema de llanura por aplicación del Sistema de Soporte de Decisión MIKE BASIN. Caso de estudio bañado La Estrella (Formosa)", Santa Fe

Gobierno de la provincia de Formosa-Ministerio de Economía, Obras y Servicios Públicos-Subsecretaría de Obras y Servicios Públicos- Dirección de Recursos Hídricos- (2000).-"Reconstrucción y adecuación hidráulica Complejo Hidrovial Ruta Nº 28- Bdo. La Estrella"- *Memoria Técnica- Informe Preliminar.*

Lagranja, C.- (2004)- "Pilcomayo río de la vida" – Gobierno de la provincia de Formosa.

User Guide – MIKE BASIN by DHI (2008-2012). "Water Resources: A modeling system for a river basin management and planning", Hørsholm.

User Guide – MIKE BASIN by DHI (2008-2012). "Temporal Analyst: Time series management and analysis in ArcGIS", Hørsholm.

http://www.banadolaestrella.org.ar/

www.proyungas.org.ar

IAHR AIIH
XXVIII CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA
BUENOS AIRES, ARGENTINA, SEPTIEMBRE DE 2018

ESTADO ACTUAL DE PROYECTOS DE AGUA POTABLE Y SANEAMIENTO BÁSICO CON INVERSIÓN PÚBLICA Y CONSTRUCCIÓN DE PAZ

Claudia Marcela Amaya
Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados, Universidad de Los Andes, Colombia
cm.amaya81@uniandes.edu.co

RESUMEN:

El acceso al agua potable es un derecho fundamental previsto en la Constitución Política Colombiana. El presente estudio evalúa integralmente la gobernanza del agua durante el periodo comprendido entre los años 2007-2016, en 100 municipios de Colombia, que representan, aquellos que han sufrido con mayor intensidad y persistencia la violencia con ocasión del conflicto armado interno. Los resultados obtenidos constituyen parámetros para la construcción de paz estable y duradera, a partir de establecer los proyectos que se requieren para garantizar el acceso al agua potable y saneamiento básico a la población residente en estos municipios.

PALABRAS CLAVES: *Gobernanza, agua potable y saneamiento básico, construcción de paz*

ABSTRACT:

Access to drinking water is a fundamental right recognized in the Colombian Political Constitution. The present study comprehensively assesses the governance of water during the period from 2007-2016, in 100 municipalities of Colombia, which have suffered the most intense and persistent violence during the internal armed conflict. The results obtained constitute parameters for the construction of stable and long-lasting peace by establishing the projects that are required to guarantee access to drinking water and basic sanitation to the population residing in these municipalities.

KEY WORDS: governance, drinking water and basic sanitation , building peace

INTRODUCCION

En Colombia han sido muchos los recursos materiales y humanos que se han perdido como resultado de la confrontación armada sufrida durante más de cincuenta años, la cual ha dejado destrucción y víctimas. Luego de la firma del Acuerdo de Paz suscrito con las Fuerzas Armadas Revolucionarias de Colombia –FARC- en noviembre de 2016, el país vive una situación coyuntural excepcional, que convoca a todos sus ciudadanos y en especial a quienes buscamos en la investigación académica lograr llevar los resultados de la misma a elementos tangibles, para lograr contribuir a la construcción de paz (Gurr, 1970) y un mejor futuro para nuestro país. De esta forma nació el proyecto objeto de este artículo.

Para ello se realizó una recopilación de la información de las entidades que tienen injerencia en la gobernanza del agua en Colombia, haciendo énfasis en proyectos presentados en la Ventanilla Única del Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio – Viceministerio de Agua y Saneamiento Básico –MVCT-VASB, de acueducto y alcantarillado en áreas urbanas, para identificar las fortalezas de aquellos que se ejecutaron con éxito y recomendar las posibles acciones a implementar en aquellos que no lograron el objetivo de brindar el derecho fundamental al agua potable y saneamiento básico a los habitantes de dichos territorios.

Se realizó un análisis técnico de la gestión de las entidades durante el periodo comprendido entre los años 2007 -2016, que tienen injerencia en el diseño, asignación de recursos, el proceso precontractual, contractual, la ejecución y el control de las obras, para el caso específico de los proyectos presentados. Se evalúa el estado de los mismos, su funcionamiento, operación y mantenimiento, con el fin de establecer los tiempos que emplean en cada uno de los procesos para plantear alternativas y soluciones a los diversos problemas encontrados.

CONSIDERACIONES SOBRE EL CONFLICTO ARMADO Y VIOLENCIA

El Instituto de Investigación sobre la Paz de Oslo (PRIO) y el Programa de Datos sobre Conflictos de Uppsala (UCDP), establecen que el conflicto se relaciona con las "incompatibilidades que involucran la forma de gobierno y/o el territorio, en las que el uso de la fuerza armada entre dos partes, de las cuales al menos una es el gobierno o Estado, resulta en por lo menos 25 muertes relacionadas con el conflicto" (Gleditsch et al., 2002, p. 19). El Instituto de Investigación sobre Paz de Estocolmo —SIPRI— (2012) determina que para que exista un conflicto armado "se requiere de 1.000 muertes anuales atribuibles al conflicto".

En el informe de El Centro Nacional de Memoria Histórica, establecen que el conflicto armado en Colombia ha provocado en 54 años aproximadamente 220.000 muertos. Al realizar un cálculo del promedio anual de muertes por esta causa, se podría establecer una cifra tentativa de 4074 muertos por año, cifra que supera al número referido en las anteriores definiciones, lo que permitiría, por lo menos desde el punto estadístico, establecer la existencia en Colombia de un de conflicto armado.

Según lo planteado por Robert Gurr (1970), y, con la interpretación realizada de lo que ha ocurrido a lo largo de la historia, en Colombia se configuró la llamada violencia política, que es el resultado de una serie de hechos que van en secuencia y, que contempla la existencia de frustración y descontento entre la población. En ese contexto hubo personas que se encargaron de "encauzar" ese descontento generando una politización del mismo y, fue así que ese descontento facilitó que se tomaran acciones, por parte de la población, en las cuales intervino el uso de la violencia.

CONSIDERACIONES SOBRE POBREZA Y VIOLENCIA

Con respecto a la pobreza y la violencia, se puede remitir a lo planteado por Robinson, J. (2016), quien realiza un análisis con respecto a lo que ha sucedido en Colombia en relación con la democracia. En su estudio hace mención a lo que ocurre en torno a los servicios públicos y a los bienes públicos, Robinson, J. (2016), en su análisis sostiene que la persistencia de la pobreza y violencia en Colombia es "la consecuencia de las facetas extractivas de las instituciones políticas, materializadas en dos dimensiones principales: la baja calidad de la democracia y la naturaleza de doble cara del débil e inefectivo estado colombiano" (p. 24).

Adicional a lo anterior, Robinson, J (2016), considera que la democracia colombiana es extractiva, lo cual explica que se debe al "grado en el que se extiende el clientelismo" (p.29). Clientelismo que se manifiesta cuando los trabajos y contratos gubernamentales se intercambian por apoyo político (Dávila y Leal, 1990).

Con relación a los bienes públicos, en los cuales están incluidos los proyectos realizados con recursos públicos, Robinson, J. (2016), menciona que "la naturaleza no competitiva y clientelista de las elecciones crea una gran cantidad de robo y desvío de fondos por parte de los políticos, lo que reduce la cantidad de dinero público asignado a los bienes públicos (p.29) y, concluye que "les roban a las personas los incentivos y oportunidades para invertir en capital humano y físico, ahorrar e innovar, todas las cosas que generan prosperidad", lo anterior hace parte del tipo de proyectos que se analizaron en este trabajo de investigación.

COSTOS DEL CONFLICTO ARMADO

Existe relación entre la guerra y la carga tributaria en Colombia; según Tilly (1985), la guerra, en este caso el conflicto armado, tiene connotaciones financieras y políticas, puesto que se requiere de gran capital para sostener por tanto tiempo el conflicto armado. Dichos recursos económicos provienen de préstamos de los grandes capitalistas, ante quienes acude el Estado Colombiano, el cual como consecuencia, acude a la figura de impuestos para subsanar dichas acreencias. Al respecto, como ejemplo se tiene el impuesto generado para la dotación de las fuerzas armadas de Colombia cuya consecuencia fue la creación de una contribución equivalente a un 5% del valor del contrato de obra pública (Corte constitucional, 1993).

Consecuencias del conflicto armado

De acuerdo con el planteamiento de Robert Gurr (1970), acerca de la deprivación relativa, en el contexto colombiano, se puede apreciar esto en las ciudades y con mayor arraigo en los municipios cercanos. En estas zonas, es posible observar un cambio abrupto en las condiciones de la oferta construida de la infraestructura física, de tal forma que, se distingue, de forma colindante o muy próxima, condiciones diferentes en la calidad y estabilidad de la construcción de viviendas, la amplitud y conservación de las vías de acceso, la disposición permanente de los servicios básicos: agua potable y alcantarillado, energía eléctrica, la oferta de acceso a establecimientos de salud, educativos, en otros.

Costos económicos asociados a la construcción de paz

Sobre los costos económicos asociados a la construcción de una paz estable, se puede hacer mención del artículo de Álvarez, S., & Rettberg, A. (2008), en el cual establece que "durante los últimos quince años, la economía colombiana ha perdido medio punto de crecimiento anual" (p.20). Al respecto, el análisis realizado por Herrera, C. (2014) en la revista Portafolio, establece que "La

guerra nos ha costado por lo menos 290 billones de pesos desde 1965, y una ineficiencia de gasto público de por lo menos 240 billones, lo que ha mermado nuestra capacidad productiva, educativa, redistributiva e incluso tributaria, causando que los colombianos no tengan las condiciones de vida que deberían tener hoy después de los múltiples esfuerzos que han realizado tres generaciones para tener un país mejor" (6 de enero2014).

En la etapa de pos conflicto, la inversión de los costos para la consolidación de la paz, debe asociarse con la revitalización de la economía, para lo cual se requiere de "formas clave entre las cuales se tiene la reconstrucción de las instituciones básicas (no sólo los ministerios o servicios públicos, sino sociales los sistemas también); reconstrucción de la infraestructura; y la reforma de la política del gobierno, la administración pública y la prestación de los servicios públicos con el fin de crear el entorno propicio necesario para las economías a desarrollar" de acuerdo con lo señalado en el documento del Departamento de Asuntos Económicos y Sociales de las Naciones Unidas. Adicional a lo anterior, allí se establece que el retorno a las actividades económicas normales, entre las cuales está la reconstrucción de la infraestructura, suele tener un importante crecimiento inmediatamente después de la finalización de los conflictos y hacen énfasis en que "es la revitalización económica un factor para lograr éxito en la consolidación de paz".

En la "Recuperación y Reconstrucción Social y Económica" (Anderlini, s. n., & El-Bushra, 2002), están inmersos los proyectos a realizar, los cuales deben involucrar "componentes funcionales de la sociedad". Tal es el caso de la reparación y construcción de infraestructura física, la seguridad interna, infraestructura financiera, sistema judicial creíble y efectivo, así como bienestar social.

El agua como elemento esencial para la construcción de una paz estable y duradera

La importancia fundamental que tiene el agua para el desarrollo humano, el medio ambiente y la economía en general es mundialmente aceptada, la organización ONU-Agua, en su vigésima reunión el 27 de enero de 2014, ha fijado unas sugerencias para un objetivo global dedicado especialmente a la protección de este recurso, de modo que se asegure "agua sostenible para todos", así como estableció la Meta A: Lograr el acceso universal al agua potable segura, saneamiento e higiene y, Meta B: Mejorar el uso y desarrollo sostenible de los recursos hídricos en todos los países, entre otras.

Para evaluar el avance de las anteriores metas se realizó este estudio de modo que se convierta en un aporte para la construcción de un nuevo país en paz.

Para determinar el alcance espacial objeto de este artículo, se partió de los datos publicados por La Unidad para la Atención y Reparación Integral a las Víctimas (UARIV) – USAID – OIM. (2010-2014), puesto que ésta creó e implementó el Índice de Riesgo de Victimización (IRV), el cual se estableció "como una herramienta estadística y un referente estratégico para el análisis de los diferentes escenarios de victimización en el marco del conflicto armado en Colombia" (p.9).

Índice de riesgo de victimización IRV.

El I.R.V.: Índice de Riesgo de Victimización, es un parámetro numérico estadístico que permitió calcular por municipio, la gravedad, la intensidad y la vulnerabilidad referido al conflicto armado, durante el periodo de tiempo comprendido entre los años 2010 al 2014.

El índice de Riesgo de Victimización condensa en una cifra numérica comprendida entre el 0 al 1, la vulnerabilidad de un territorio para la ocurrencia de hechos victimizantes a los habitantes en ese espacio. Se calcula mediante la ponderación estadística de ocho dimensiones (hechos, acciones, presencia, demográfico, geográfico institucional y socioeconómico y otro) asignados numéricamente para cada uno de los hechos victimizantes ocurridos en un territorio y en un lapso de tiempo, de tal manera que a mayor ocurrencia de fenómenos victimizantes y la gravedad e intensidad de los mismos, (por ejemplo que generen heridos, muertos, o desplazamiento en dicho territorio) obtendrá un valor más cercano a 1 y si no se presentan dichos fenómenos o su gravedad

es mínima el valor tenderá a ser cero. Los valores de esta clasificación del I.R.V., se establecen de la siguiente forma:

Alto (0.6 -1) Medio Alto (0,59-0,36) Medio (0,35-0,2) Bajo (0,19 – 0)

Se tuvieron para este trabajo en cuenta los municipios con clasificación de I.R.V., Alto, Medio Alto y Medio. Luego se organizó la información del IRV por orden, teniendo en cuenta el número de municipios afectados de cada departamento, de acuerdo con la proyección de población realizada por el Departamento Administrativo Nacional de Estadística –DANE- para el año 2014, con lo cual se determinó la cantidad de población afectada en esos departamentos.

De la revisión de la información del IRV, se documentaron hechos victimizantes con categoría entre Alto, Medio Alto y Medio a 395 municipios pertenecientes a 25 de los 32 Departamentos en que está distribuida administrativamente Colombia; ello infiere que los hechos de violencia cubrían la mayor parte de la geografía nacional durante el periodo estudiado. Del parámetro anterior resultaron excluidos los departamentos de Amazonas, Atlántico, Magdalena, Quindío, Risaralda, Sucre y San Andrés.

Entre los cinco primeros lugares, en el listado por departamentos con mayor cantidad de municipios y población con categoría de IRV entre Alto, Medio - Alto y Alto en Colombia, están en primer lugar Antioquia con 64 municipios y una población afectada de más de cuatro millones de personas, le sigue el departamento del Cauca con 39 municipios y casi un millón trescientos mil habitantes afectados; Nariño con 36 municipios y casi un millón de habitantes; Tolima con 33 municipios y aproximadamente seis cientos mil habitantes; y en el quinto lugar está, con 21 municipios el departamento de Huila con una población de aproximadamente novecientos cincuenta mil habitantes.

Al analizar los municipios por población se encontró que, en el caso de las capitales de los departamentos, se generaba una distorsión dado el gran número de habitantes que se ubican en estas zonas, por lo cual se decidió generar el uso del Log10 para generar un balance con respecto a la influencia de este factor en la selección de los municipios del presente estudio.

De acuerdo con lo anterior se aplicó la siguiente fórmula matemática, denominada “Formula de Prelación”, la cual está compuesta por un primer término que es el resultado de la sumatoria de los mayores valores correspondientes a IRV, para cada uno de los municipios, en el periodo comprendido entre los años 2010 al 2014 y, por un segundo término fundamentado en la proyección de población realizada por el DANE, con base en los censos poblacionales precedentes y el desarrollado en el año 2005 –que es el último disponible a la fecha-, de tal forma que la fórmula matemática para establecer la selección de los municipios es la siguiente [1]:

$$Indicador\ de\ PRELACIÓN = \sum IRV * Log_{10}\ Población\ (proyectada\ según\ el\ DANE\ a\ 2014) \qquad [1]$$

El resultado de la aplicación de dicha fórmula permitió obtener un número al que se ha denominado Indicador de Prelación, ejercicio que se realizó para la totalidad de municipios de Colombia, luego de lo cual se procedió a ordenar de mayor a menor de acuerdo con este parámetro, con lo cual se contemplaron los cien (100) municipios a considerar en el presente estudio, los cuales se indican a continuación la Figura - 1, con color amarillo los departamentos y entre paréntesis el número de municipios de cada uno. Al respecto se encontró una coincidencia en 76 de los 100 - municipios del presente estudio-, que fueron seleccionados para la suscripción especial para la paz, contemplado en el acuerdo de paz firmado, lo cual reafirma la representatividad del universo seleccionado.

Figura 1.- Departamentos seleccionados para el presente estudio.

En los 100 municipios de Colombia con mayor IRV entre 2010-2014 seleccionados, la población a 2014 (de acuerdo a las proyecciones de población estimadas por el DANE), corresponden aproximadamente al 8% de la población total del país.

Metodología para selección de los proyectos

Determinados los 100 municipios se generó la revisión de todos los proyectos radicados en la ventanilla única del Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio (MVCT) -Viceministerio de Agua y Saneamiento Básico (VASB), por parte de estos municipios. Se hace énfasis en que se evaluaron los proyectos con base en la Resolución 379 de 2012 del MVCT.

Luego de obtener la aprobación que equivale al término de "viabilización" de los proyectos por parte del MVCT - VASB, se realizó el seguimiento a los proyectos de obras para proveer agua potable y alcantarillados que se adelantaron en las zonas urbanas de los municipios seleccionados que se encontraban terminados o en proceso de liquidación, de acuerdo con la base de datos del MVCT- VASB, denominada SIGEVAS.

Análisis de los proyectos radicados

Revisada la base de datos del MVCT-VASB, de los 100 municipios seleccionados, se identificaron 809 proyectos en total radicados de los cuales 786 fueron presentados para los municipios y 23 que involucraban proyectos entre varios municipios, por lo cual tienen alcance regional. Únicamente el municipio Cantagallo del departamento de Bolívar, no radicó proyectos.

De los 786 proyectos con alcance Municipal, en cuanto a su clasificación dentro de los procesos de revisión documental, legal y técnico, se encontró que (409) proyectos fueron "Devueltos para ajustes"; (37) están en "Estudio", 43 fueron y/o se encuentran en "Requerimiento y Lista de Chequeo" (6) proyectos fueron "Retirados", (257) proyectos fueron "Declarados Viables", (34) proyectos recibieron "Concepto favorable".

De lo anteriormente indicado vale la pena resaltar que más de la mitad de los proyectos radicados son "devueltos para ajustes", entre las causas que originan esta situación se encontró que los proyectos presentados no cumplen con la totalidad de los requerimientos Documentales,

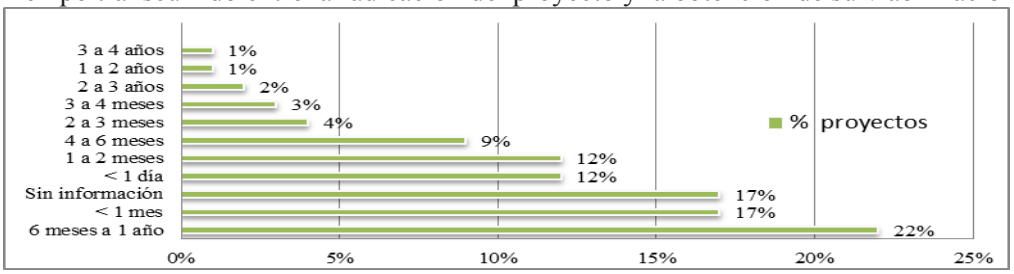
Legales, Institucionales, Técnicos, Financieros, Ambientales y Prediales establecidos por el MVCT, en la resolución 0379 de 2012. Los proyectos declarados viables son los que cuentan con recursos nación para su ejecución, los proyectos con concepto favorable son los que cumplen con lo establecido técnicamente en la Resolución 379/12 pero que no cuentan con recursos para su ejecución.

A los(257) proyectos viables, les fueron asignados recursos por $196.213.848,88 USD, de estos el (72%) correspondieron a recursos de la Nación y el (28%) a contrapartidas (de los municipios, gobernaciones u otras fuentes).

Análisis de los tiempos de trámite de los proyectos en el MVCT-VASB.

En el proceso de Viabilización que es el tiempo transcurrido entre la radicación del proyecto en la ventanilla única del MVCT-VASB y la obtención de aprobación de la misma, los resultados se presentan en la Gráfica 1. Cabe resaltar que del total de la información se encontró un (17%) de los proyectos sin datos para poder generar este análisis.

Gráfica 1.-Tiempo transcurrido entre la radicación del proyecto y la obtención de su viabilización.



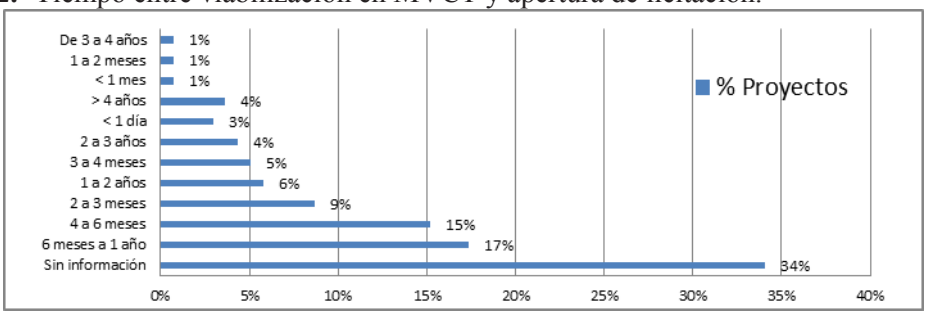
Análisis de los tiempos de los procesos pre y contractuales entidades ejecutoras.

Son actividades que comprenden la revisión documental del proyecto, establecer los términos de referencia de la licitación así como los requisitos de experiencia general y específica, que deben contener a su vez las condiciones de capacidad técnica y financiera para realizar la convocatoria y respectiva selección de los proponentes que ofrezcan las mejores condiciones para la ejecución de las obras. Dichos procesos están a cargo de diversas entidades en Colombia, como lo son las alcaldías y las empresas prestadoras del servicio, entidades gubernamentales como FONADE (Fondo Financiero Proyectos de Desarrollo, FINDETER (Financiera de Desarrollo Territorial) y los Planes Departamentales de Agua (PDA) dependientes de la Gobernaciones.

- **Tiempo desde la viabilización hasta la apertura de la licitación.**

De los datos obtenidos, se deduce que con respecto a los tiempos que demanda el proceso precontractual, que comprende que el ente asignado realice la apertura de la licitación demora más que el proceso de evaluación técnica y la asignación de recursos.

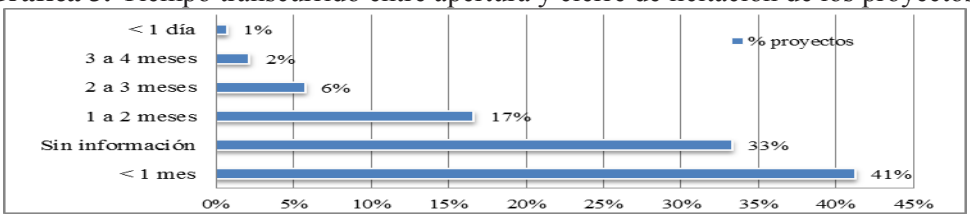
Gráfica 2.- Tiempo entre viabilización en MVCT y apertura de licitación.



- **Tiempo entre apertura y cierre de licitación**

Este proceso administrativo es ágil, pues la mayoría, según los datos, tarda menos de un mes. Como se aprecia a continuación:

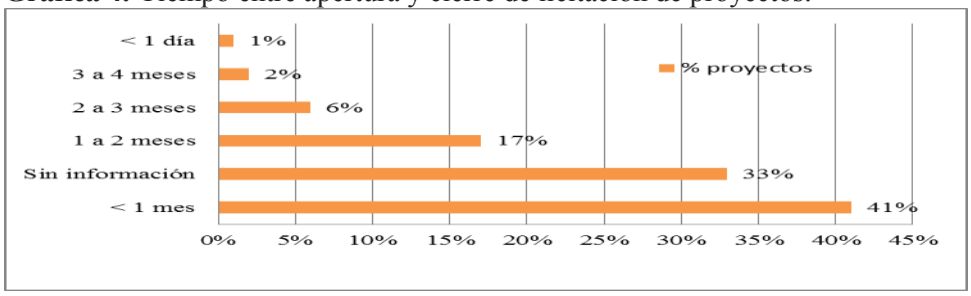
Gráfica 3.-Tiempo transcurrido entre apertura y cierre de licitación de los proyectos.



- **Tiempo entre cierre de licitación y suscripción de contratos**

Los datos muestran que este, que pareciera ser el proceso más sencillo pues sólo demanda la impresión de un modelo de contrato preestablecido, el cual es conocido por las partes, y recoger las firmas respectivas, resulta ser un proceso engorroso y dispendioso de todos.

Gráfica 4.-Tiempo entre apertura y cierre de licitación de proyectos.

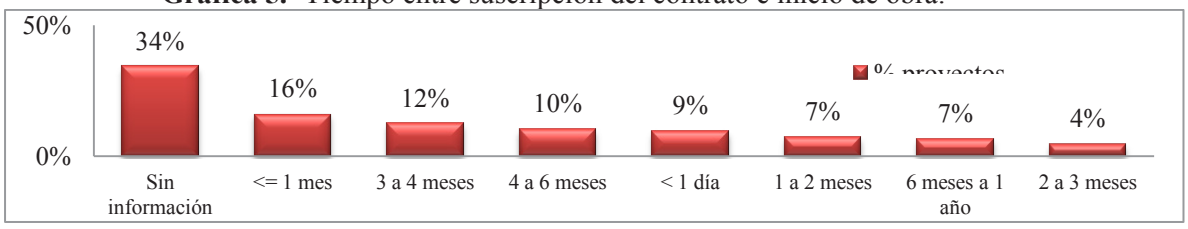


Se concluye que el tiempo que tarda la suscripción del contrato es un elemento que debe ser revisado, especialmente los procedimientos establecidos por las entidades que intervienen en dicho proceso, puesto que este trámite puede tardar incluso más tiempo que el proyecto en ser viabilizado por el MVCT-VAB.

- **Tiempo para la suscripción del contrato e inicio de la obra**

Se realizó la tabulación del tiempo promedio entre la suscripción del contrato y el inicio de la obra, el cual contempla el tiempo parar la aprobación de las garantías que respaldan al contratista en la etapa precontractual, así como la contratación del interventor, son los tiempos que se presentan continuación en la Gráfica 5.

Gráfica 5.- Tiempo entre suscripción del contrato e inicio de obra.



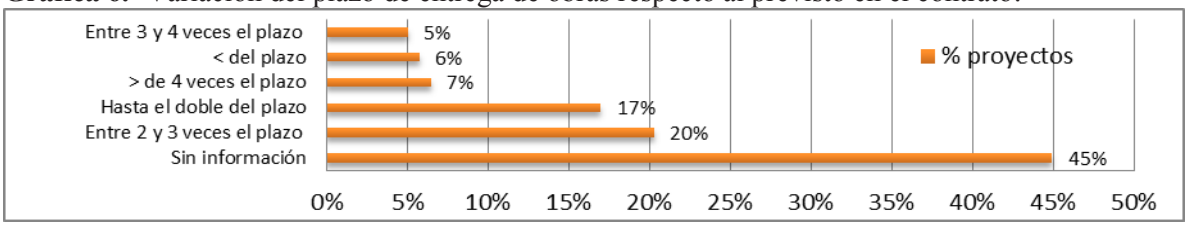
Como puede apreciarse, en este trámite la eficiencia administrativa no genera buenos resultados, puesto que el 29% de los proyectos tienen una demora en su inicio entre dos y seis meses, tema que debería ser revisado por las entidades con el fin de tomar las medidas a las que haya lugar para reducir estos tiempos a lo estrictamente necesario, una sugerencia que se genera, es

establecer este tiempo de inicio desde los pliegos de la licitación so pena de sanciones e incumplimientos a la parte que le corresponda.

- **Tiempos de ejecución y entrega de obras: cumplimiento del plazo**

Es preciso hacer mención sobre el plazo real en tiempo, el cual se tomó entre la firma del acta de inicio y terminación de las obras, por lo que, se incluyeron los tiempos adicionales otorgados como prórrogas y/o suspensiones por diversos motivos en este análisis.

Gráfica 6.- Variación del plazo de entrega de obras respecto al previsto en el contrato.

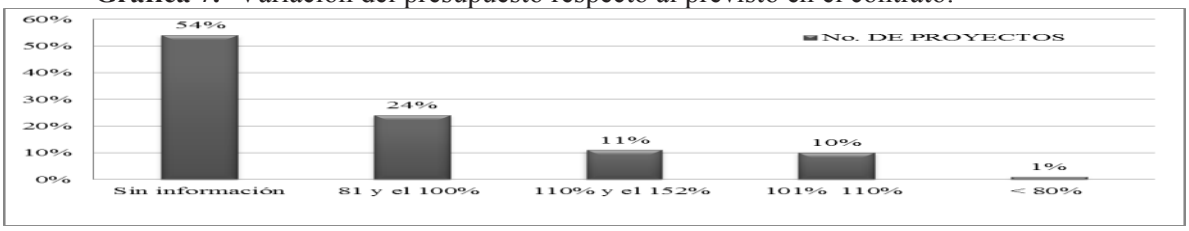


Lo ilustrado en la gráfica anterior invita a reflexionar sobre los tiempos que se establecen para la ejecución de obras, de modo se sugiere que las entidades ejecutoras revisen de forma exhaustiva, las razones por las cuales se genera tanta dilación; y, de ser posible, concebir las correcciones a dichos temas, antes del inicio de la obra, para asegurar la ejecución de los proyectos en tiempos reales.

Análisis del cumplimiento del presupuesto de obra

Luego de realizar la compilación de la información referente al valor final de las obras ejecutadas respecto al presupuesto fijado en los contratos de ejecución de los proyectos de agua potable y saneamiento básico, en los 100 municipios con mayor IRV en Colombia entre los años 2010-2014, se tienen los resultados presentados en la Gráfica 7,mostrada a continuación:

Gráfica 7.- Variación del presupuesto respecto al previsto en el contrato.



Las enormes variaciones, en el plazo de ejecución y entrega de las obras, repercuten en el incremento de los costos de ejecución de las actividades con el paso del tiempo, que relaciona el costo inicial previsto en el contrato respecto al costo final de las obras ejecutadas.

Es importante mencionar que la información encontrada sobre los costos finales de las obras, no implican siempre el logro del objeto previsto en los contratos; infortunadamente este elemento no se pudo analizar debido a que no existe la suficiente información documental, pues no se encontraron en el Sistema Electrónico para la Contratación Pública –SECOP- las actas de mayores y menores cantidades de obra, pese a que de acuerdo con la legislación colombiana, esto es una obligación legal se debe actualizar mensualmente la información sobre todos los contratos que impliquen inversión pública, prevista en la ley de transparencia (Ver ley 1712/2014).

Análisis de la información de la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios –SSPD-

Con el objeto de corroborar y verificar el impacto producido por la ejecución de los proyectos viabilizados por el MVCT-VASB a partir del 2010, en el mejoramiento de los

indicadores de la cobertura de los servicios de acueducto y alcantarillado, en los 100 municipios seleccionados, se revisó la información registrada en el Sistema Único de Información de Servicios Públicos -SIU – que es la base de datos online de la SSPD- sobre la cobertura de los servicios de acueducto y alcantarillado por municipio.

Con respecto a la cobertura del servicio de acueducto y alcantarillado es preciso mencionar que luego de revisada la información en el SUI, la misma presentaba gran cantidad de inconsistencias las cuales se le informaron de forma escrita a la SSPD, y, la respuesta obtenida fue que la información oficial es la que está en la página, por lo cual si bien se realizó un análisis detallado de las inconsistencias halladas los resultados de la misma no permiten establecer conclusiones.

- **Calidad del agua**

Para el análisis de la información se empleó la información disponible en el MVCT - VASB – cuya fuente es la SSPD-, que recopila los datos del índice de riesgo de consumo de agua potable – IRCA- por municipio desde el año 2007 al 2016. Se debe precisar que se asignó un valor de 100 en aquellos años en los cuales no se obtuvo información (N.D.) para obtener el promedio aritmético del IRCA por municipio. La información se presenta en la Tabla 1.

Tabla 1.- Número de los municipios de estudio según parámetros del IRCA.

NIVEL DE RIESGO	CANTIDAD DE MUNICIPIOS SEGÚN IRCA PERIODO -2007-2016									
	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Inviable Sanitariamente	10	10	7	1	2	1	3	7	6	6
Alto	20	27	23	21	21	22	19	13	17	7
Medio	22	18	18	18	19	20	12	13	13	16
Bajo	12	19	23	19	18	19	19	26	16	18
Sin Riesgo	21	22	26	34	36	31	41	30	37	36
Sin Información	15	4	3	7	4	7	6	11	11	17
TOTAL MUNICIPIOS	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

La tendencia en todos los rangos del IRCA a nivel nacional presenta un comportamiento similar a la de la muestra de los 100 municipios estudiados. En Colombia, según el análisis de los datos, se suministró agua sanitariamente inviable en 53 municipios en el 2007, descendiendo a 18 municipios en el 2015. El riesgo alto disminuyó de 242 municipios a 99; el de riesgo medio descendió de 229 a 165; y se aumentó el número de municipios que suministran agua de bajo riesgo pasando de 158 a 240 y agua sin riesgo de 286 a 489 municipios, lo cual se aprecia en la Tabla 2.

En los 100 municipios estudiados, la calidad del agua suministrada está por debajo del promedio nacional, en forma comparativa para el año 2015, mientras el 6% de los municipios estudiados recibían agua inviable sanitariamente, el promedio nacional era del 2%; con respecto al riesgo alto el 17% frente al promedio nacional que fue del 9%; en riesgo medio y bajo son similares las cifras 13% y 15%, y con respecto al riesgo bajo fue de 18% y 19%; pero en cuanto a agua sin riesgo se encontró 37% y 46%. Lo anterior permite concluir que los municipios que han sufrido con mayor rigor la violencia, reciben agua con parámetros inferiores de calidad que el promedio nacional.

Tabla 2.- Número de los municipios a nivel Nacional según parámetros del IRCA.

	CANTIDAD DE MUNICIPIOS A NIVEL NACIONAL SEGÚN IRCA PERIODO -2007-2015								
	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Inviable Sanitariamente	53	51	29	20	21	18	20	21	18
Alto	242	244	204	173	167	158	118	99	99
Medio	229	229	221	193	206	216	172	165	165
Bajo	158	194	210	212	233	226	232	240	204
Sin Riesgo	286	304	365	442	394	427	507	489	512
Sin Información	134	80	73	62	81	57	53	88	104
TOTAL MUNICIPIOS	1102	1102	1102	1102	1102	1102	1102	1102	1102

Conclusiones

Los hechos violentos de mayor intensidad y permanencia del IRV durante el periodo analizado (2010-2014), se localizan principalmente en los municipios periféricos que está en concordancia con lo planteado por Robinson, J. A. (2016), destacándose los departamentos de Nariño con 11 municipios, Antioquia, Meta y Caquetá con 8 municipios.

Noventa y nueve de los 100 municipios seleccionados en el presente estudio, presentaron 809 proyectos de agua potable y saneamiento básico para ser viabilizados por el Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio (MVCT), acatando el mecanismo establecido por el Estado para atender la necesidad en esta materia. En promedio, cada municipio de los 100 estudiados, radicó más de 8 proyectos destinados a la intervención en agua potable, alcantarillados y sistemas de aseo.

Se evidenció la demanda urgente de parte de los municipios del presente estudio de disponer de agua suficiente, salubre, aceptable, accesible y asequible para el uso personal y doméstico en sus territorios, de los cuales setenta y tres 73 de los 100 municipios estudiados, recibieron inversión pública para proyectos de acueducto y alcantarillado en el área urbana.

Es importante resaltar la cifra de proyectos suspendidos 137, muy cercana a los proyectos que se encuentran en ejecución 175, lo cual hace evidente la gran cantidad de dificultades de diversa índole que impactan la ejecución de los proyectos de agua potable y alcantarillado en los territorios. Es importante para las entidades encargadas de la gobernanza del agua, realizar un análisis de las causas que generan estas suspensiones, para establecer las respectivas soluciones. Lo anterior para que los proyectos culminen de forma exitosa lo cual es una muestra indeleble de la presencia del Estado que contribuye y repercute directamente en la salud de los habitantes de estos territorios, con la consecuencia en la disminución de las enfermedades cuyo origen es hídrico y de esta forma contribuir directamente en la construcción de paz.

Para los proyectos estudiados, el promedio del tiempo adicional otorgado por concepto de prórrogas y/o suspensiones a los contratos en curso, asciende a 388 días que equivale a 1.95 veces el plazo contractual promedio. De acuerdo con lo encontrado los valores finales de los proyectos se incrementaron hasta un 52% con respecto al valor establecido en el contrato. Esto puede ser una de las causas, así como también una de las consecuencias, de las suspensiones y prórrogas que se generan; lo anterior puede conllevar a una afectación en el equilibrio económico de parte del contratista que puede conllevar procesos jurídicos y aumento en los tiempos de liquidación.

Los proyectos de agua potable y/o alcantarillado deben surtir una serie de procesos en varias entidades que ejercen la gobernanza sobre el agua en Colombia, para los municipios seleccionados por poseer el mayor IRV entre el periodo de tiempo 2010-2014, que arrojo un tiempo desde la fecha

de radicación hasta la conclusión de las obras en promedio de 3,5 años, tiempo excesivo que genera desfase económico entre el proyecto concebido al momento de su ejecución.

El mayor tiempo lo demandan los procesos de elaboración de los términos de referencia o pliegos de condiciones para realizar la apertura del proceso licitatorio de las obras, lo cual puede denotar una "posible ineficiencia" que las entidades encargadas del proceso de contratación que incluye la selección de los contratistas de obra e interventoría para la ejecución de las obras tarden según lo encontrado en promedio 375 días para completar los requisitos necesarios para la apertura de la licitación de un proyecto

Al respecto sería importante que se genere directrices a nivel estatal para establecer un pliego único para todas las licitaciones públicas que obligaría a reducir sustancialmente el tiempo de este trámite y restringiría las prácticas que conducen a la corrupción, falta de transparencia y/o clientelismo (Dávila y Leal, 1990).

Dada la obligación constitucional de brindar agua potable a todos los ciudadanos de Colombia es urgente que todas las autoridades que ejercen gobernanza sobre el agua, tomen medidas efectivas para garantizar que los proyectos de infraestructura básica de agua potable y alcantarillado se materialicen en el territorio y surtan el efecto de mejorar las condiciones de vida de los habitantes de estos municipios en el menor tiempo posible, como elemento esencial para contribuir en la construcción de paz y la presencia del estado en los territorios.

Referencias Bibliográficas

Álvarez, S., & Rettberg, A. (2008). Quantifying the economic effects of conflict: An Exploration of the Costs and the Studies on the Costs of the Colombian Armed Conflict. Colombia Internacional, (67), 14-37. Pág. 20.

ANDERLINI, S. N., & EL-BUSHRA, J. U. D. Y 2002. Reconstrucción Posconflicto.

Herrera, C. (2014). "La guerra costó 36 por ciento del PIB". En: Portafolio. 6 de Enero.

Leal, F., y Dávila, A. (1990). Clientelismo en Colombia: el sistema político y su expresión regional. Bogotá: Tercer Mundo.

Página oficial de la Superintendencia de Servicios Públicos. Recuperado de: http://www.superservicios.gov.co/Acueducto-Alcantarillado-Aseo/Acueducto-y-alcantarillado

Robinson, J. A. (2016). " La Miseria en Colombia ." En: Desarrollo y Sociedad, 76 (1).

Robinson, J. A., & Verdier, T. (2013). "The political economy of clientelism". Scandinavian Journal of Economics, 115(2).

Tilly, C. (1985). "War Making and State Making as Organized Crime, en Theda Skocpol, Peter Evans y Dietrich Rueschemeyer". Bringing the State Back. Cambridge: Cambridge University Press.

T. Robert Gurr, (1970). Why Men Rebel? Princeton: Princeton University Press (introducción, capítulos 1 y 2). Página 12, 33.

Unidad para la atención y Reparación integral a las víctimas – USAID – OIM. Índice de riesgo de victimización (2010-2014).

United Nations. Peacebuilding Commission Working Group on Lessons Learned, 22 November (2010). Economic revitalization in peacebuilding and the deployment of service based infrastructure. Background Paper. Pp. 2, 4

Villa, Edgar, Restrepo, Jorge A. y Moscoso, Manuel, (2014). "Crecimiento económico, conflicto armado y crimen organizado, evidencia para Colombia." Pág. 187

IAHR AIIH

XXVIII CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA
BUENOS AIRES, ARGENTINA, SEPTIEMBRE DE 2018

MAPAS DE RIESGO POR INUNDACIÓN EN LA CIUDAD DE AGUASCALIENTES, MÉXICO A PARTIR DE MODELACIÓN HIDRÁULICA DEL DRENAJE URBANO

Ángel Bautista Tadeo, Luis Antonio Montesinos Pérez, Lucía G. Matías Ramírez, y Nina Danae Ramírez González.

Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED); México, abautista@cenapred.unam.mx Universidad Autónoma metropolitana, Azcapotzalco, México, luisantonio012@gmail.com Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED); México, lgmr@cenapred.unam.mx Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED); México, nramirez@cenapred.unam.mx

RESUMEN

Debido a diversos eventos de inundación presentados en cuatro colonias de la ciudad mexicana de Aguascalientes, se realiza un análisis hidrológico e hidráulico para determinar el peligro y vulnerabilidad ante eventos de distintas probabilidades de excedencia.

ABSTRACT

A hydrological and hydraulic analysis to determine the danger and vulnerability to flooding events for different probabilities of exceeding is developed to four suburbs of Aguascalientes city, Mexico.

PALABRAS CLAVES: *Hazard, peligro, vulnerabilidad, inundación, flooding*

INTRODUCCIÓN

Se presentan los mapas de tirante, velocidad, severidad, vulnerabilidad y riesgo de inundación para cuatro colonias en la ciudad de Aguascalientes, México. Se utiliza un modelo lluvia-escurrimiento para estimar los volúmenes de agua que ingresan al sistema de alcantarillado producto de la precipitación asociada a algún periodo de retorno, los volúmenes de escurrimiento incapaces de ser conducidos por la red drenaje urbano o de desborde obtenidos por la simulación de la red de drenaje, se consideran como condición de frontera en un modelo de flujo bidimensional.

Debido a la falta de un software no comercial que permita acoplar la modelación de la red de drenaje y la representación de desborde de la misma, se utilizan dos modelos hidráulicos de uso libre para representar el peligro de inundación, la representación numérica del sistema de alcantarillado se realiza en modelo unidimensional SWMM de la Environmental Protection Agency (EPA) de los Estados Unidos y los volúmenes de escurrimiento no captado o de desborde con ayuda de una malla bidimensional en HecRas de los Cuerpos de la Armada de los Estados Unidos (U. S. Army).

Para ello, se aplican sistemas de información geográfica con la finalidad de contar con referencias espaciales entre los modelos hidráulicos utilizados, información climatológica y topográfica de acceso libre, además del catastro de la red de drenaje urbano facilitada por las autoridades del gobierno local.

METODOLOGÍA

Antecedentes

Históricamente la ciudad de Aguascalientes cuenta con registros de precipitaciones importantes, que generaron inundaciones de distintos orígenes, tales como: desbordamiento de ríos o bordos, rotura de presas e insuficiencia en el drenaje urbano, en la tabla 1 se muestran algunos eventos en distintas épocas.

Tabla 1.-Algunos registros de inundación en Aguascalientes 1976-2013

Fecha	Municipio Localidad	Daños	Muertos	Damnificados	Viviendas afectadas	Fuente hemerográfica
7/14/1976	Varios municipios	El ganado ha sido arrastrado por las corrientes de agua, más de 500 familias damnificadas sin hogar. Varias presas se han desbordado.	12	2000	500	Excélsior
8/03/1990	Aguascalientes	Una de las cortinas de la presa Valerio tronó e inundó las poblaciones La Presa y Chinampa, el desbordamiento provocó un derrame en la presa El Tanque.			6000	La Jornada
10/16/2006	Aguascalientes	15 familias reubicadas. De las 1600 viviendas afectadas, 1200 pertenecen a una colonia construida sobre el cauce del río.			1600	

Por otra parte, existen las unidades de protección civil dedicadas a atender a la población en situaciones de emergencia, en este caso la Coordinación Estatal de Protección Civil (CEPC) de Aguascalientes cuenta con un amplio registro de inundaciones ocurridas en años recientes en la zona urbana, de ella se obtienen datos valiosos, como la ubicación de las colonias con propensión a sufrir inundaciones.

La *Figura 1*, muestra los polígonos de los límites de las colonias con incidencia de inundaciones en el municipio de Aguascalientes, elaborada con la información recopilada por las autoridades de Protección Civil.

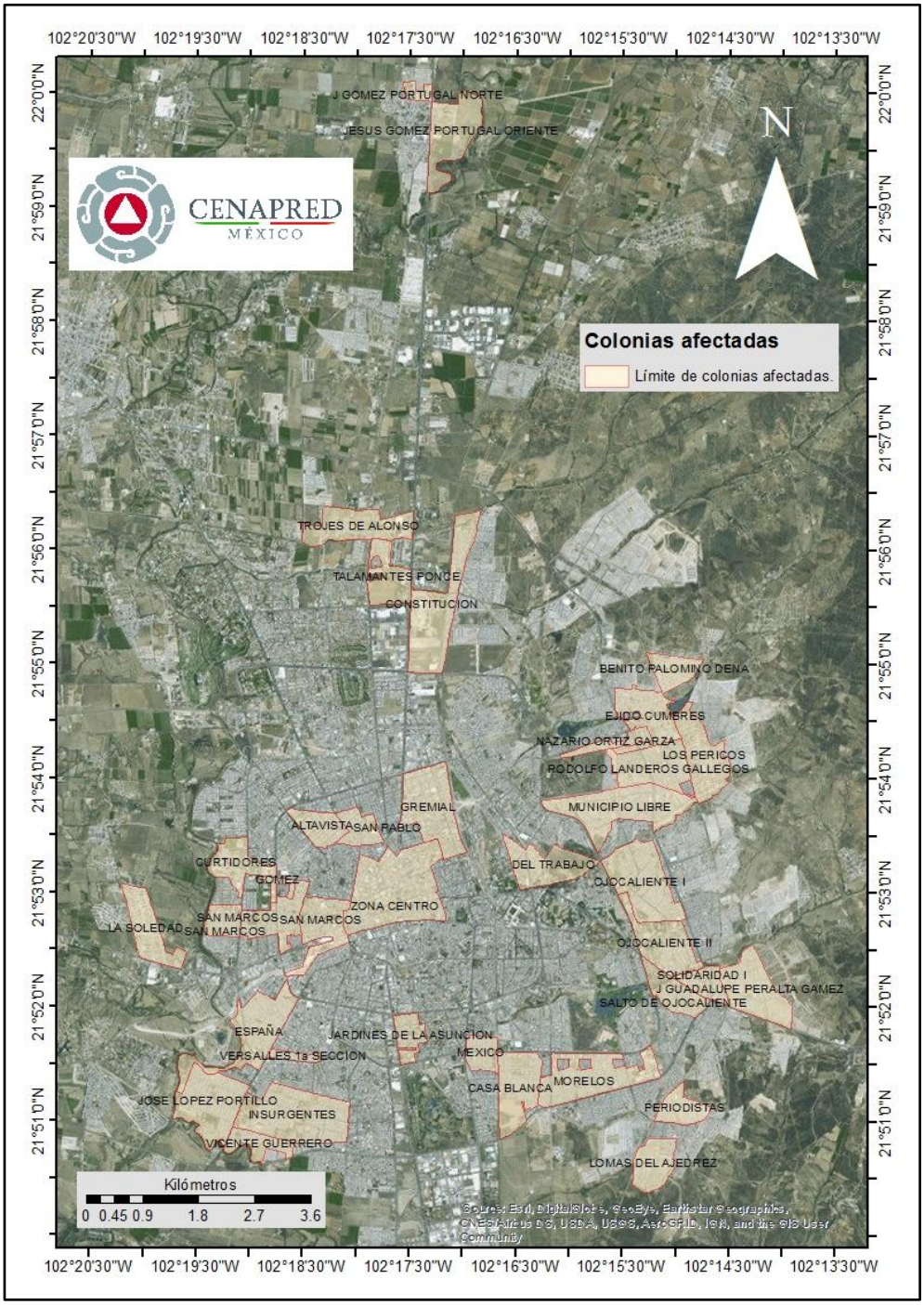


Figura 1.- Colonias afectadas por inundación de 2010 a 2016 en Aguascalientes.

Selección de la zona de estudio

Con base en la información proporcionada por la Coordinación Estatal de Protección Civil de Aguascalientes, se identificaron varias colonias susceptibles de inundación en el periodo de 2010 a 2016. El municipio de Aguascalientes carece de un estudio a detalle sobre inundaciones, por ello se tomó la decisión de realizar un análisis de inundaciones para la zona urbana de Aguascalientes, debido a que cuenta con una población de 1,313 millones. Sin embargo, se decidió tener un caso de estudio, debido a las implicaciones de analizar una ciudad de grandes dimensiones, así se delimitó a sólo cuatro colonias Insurgentes, José López Portillo, Vicente Guerrero y España, por el número de casos de inundación, además de contar con insumos necesarios, por ejemplo, los modelos digitales de elevación (MDE) de las colonias mencionadas.

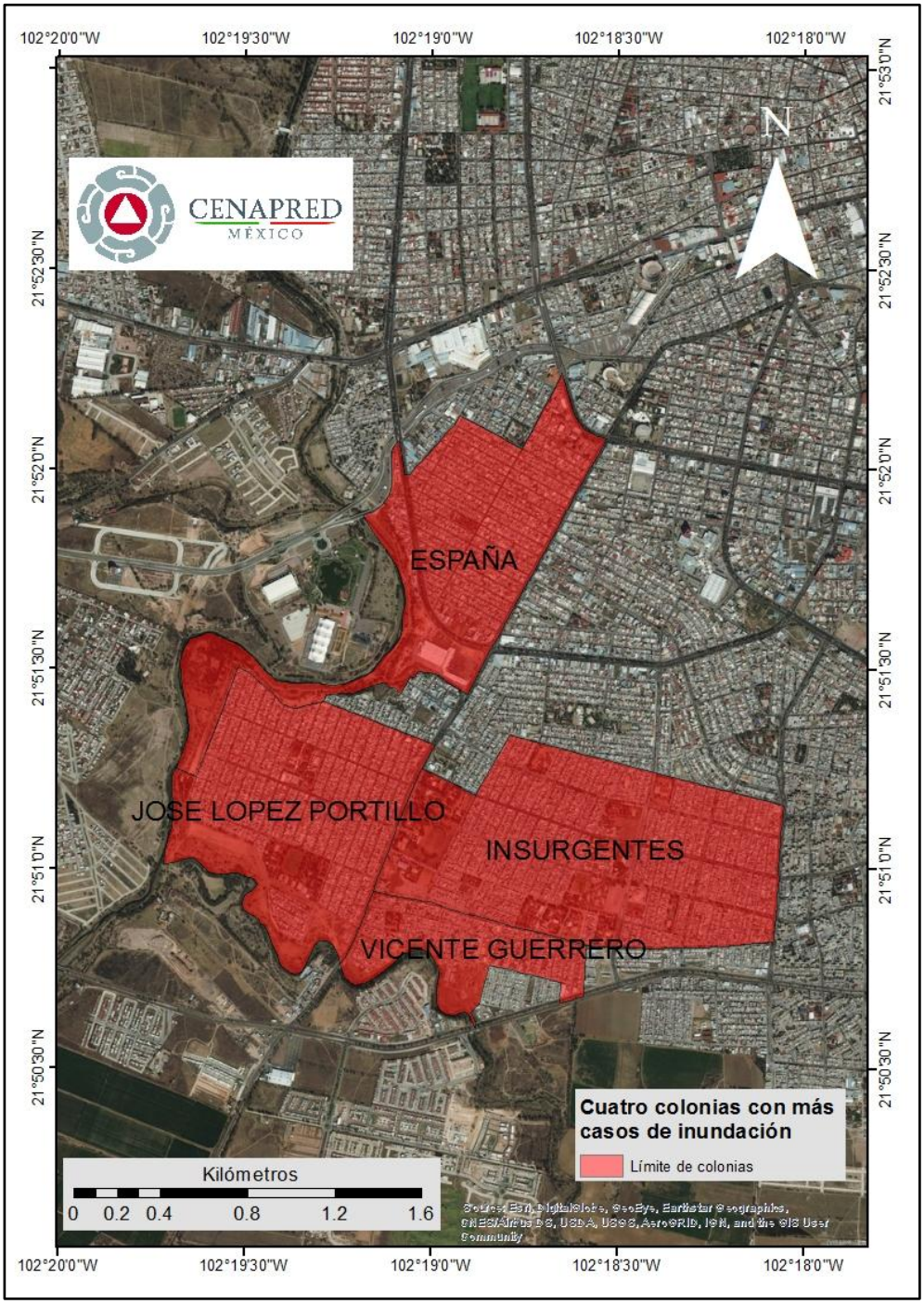


Figura 2.- Colonias con mayor número de reportes de inundación.

OBTENCIÓN DEL PELIGRO POR INUNDACIÓN

Análisis Hidrológico

Se realizó un análisis hidrológico con base en la información climatológica de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) y del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), se tomaron en cuenta las precipitaciones de las estaciones que influyen en la cuenca hidrológica, pero que contaron con un mínimo de veinte años de registro, definidas las estaciones a utilizar se identificó el dato máximo anual de precipitación, para cada una y se aplicaron ajustes de diferentes funciones de probabilidad. Se utilizaron siete estaciones de influencia para las cuales se ajustaron a distribuciones de tipo Gumbel y se obtuvieron los las precipitaciones asociadas a los periodos de retorno 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200, 500, 1000 años.

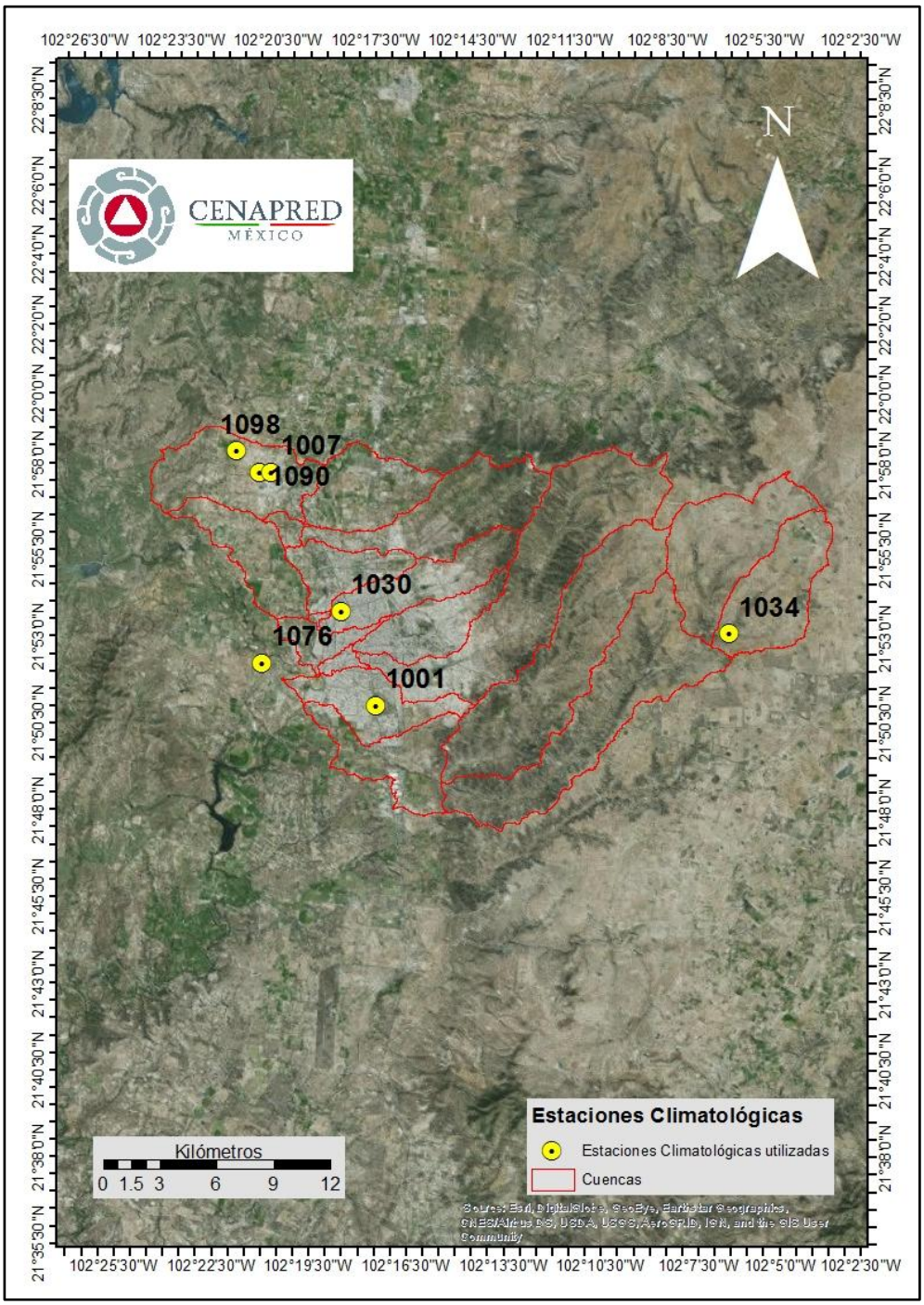


Figura 3.-Estaciones climatológicas analizadas en la zona de estudio.

Mediante polígonos de Thiessen se obtuvo la lluvia media en la cuenca de influencia, para los periodos de retorno necesarios, los cuales a su vez son transformados en gasto, con ellos se construyeron hidrogramas de ríos con incidencia en la zona de influencia, para obtener las condiciones de frontera al modelo hidráulico. De esta manera se determinaron los hidrogramas que serán transitados tanto en los ríos colindantes a las colonias analizadas como los de entrada en la red de drenaje.

En la tabla 2 se muestran los valores de precipitación, intensidad y gasto para distintos periodos de retorno para una de las cuencas tributarias.

Tabla 2.-Precipitación, intensidad y gasto para una de las cuencas de influencia.

Tr	hp, mm	I, mm/s	Q, m³/s
2	22.77	10.51	28.08
5	34.73	16.03	42.83
10	39.23	18.11	48.39
20	43.35	20.01	53.47
50	48.87	22.56	60.28
100	53.31	24.60	65.75
200	58.11	26.82	71.67
500	64.82	29.92	79.95
1000	70.05	32.33	86.40

Modelación numérica de la red de drenaje con SWMM

En un principio se definió utilizar únicamente el programa HecRAS, pero al contar con el catastro de la red de alcantarillado público de la zona urbana de la ciudad de Aguascalientes, esto no fue posible, debido a que dicho modelo no está pensado para una representación de ese tipo, así se optó por utilizar software EPA SWMM, el cual se emplea para modelar sistemas de drenaje, y así obtener los volúmenes de desbordamientos de cauces y tuberías.

Primero se ingresaron las características de los conductos de drenaje (diámetro, longitud y rugosidad) para cada tramo y pozo de visita, así como las secciones naturales de los ríos, para analizar un posible desbordamiento en las cuatro colonias que se identificaron como susceptibles de inundación.

Figura 4.- Red de alcantarillado y ríos en la zona de estudio.

De la modelación se obtuvieron hidrogramas de desborde similares al presentado en la figura 5, éstos son la condición de frontera para la modelación del escurrimiento sobre las calles, se contó con múltiples escenarios en función del periodo de retorno y la respuesta del drenaje conjunto (ríos y alcantarillado), así construyeron hidrogramas de desborde para los nodos representados en la modelación unidimensional.

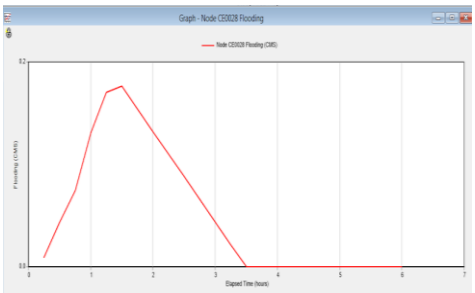


Figura 5.- Hidrograma de desbordamiento

Modelación numérica de la red de drenaje con SWMM

Para complementar el análisis se crearon una o varias mallas que representaron el terreno en HecRAS y se ingresaron como condiciones de frontera los resultados anteriores. Se introdujeron los hidrogramas de desbordamiento para simular el escurrimiento sobre las calles de las cuatro colonias en análisis, obteniéndose de éste las profundidades y velocidades de agua.

Al obtener los resultados para todos los periodos de retorno, se exportaron los diferentes archivos en formato de raster, es importante mencionar que en las simulaciones de HecRas fue necesario incluir los ríos que pasan por la ciudad, debido a que en el modelo del sistema de alcantarillado no hay nodos del río que presentaron desbordamiento.

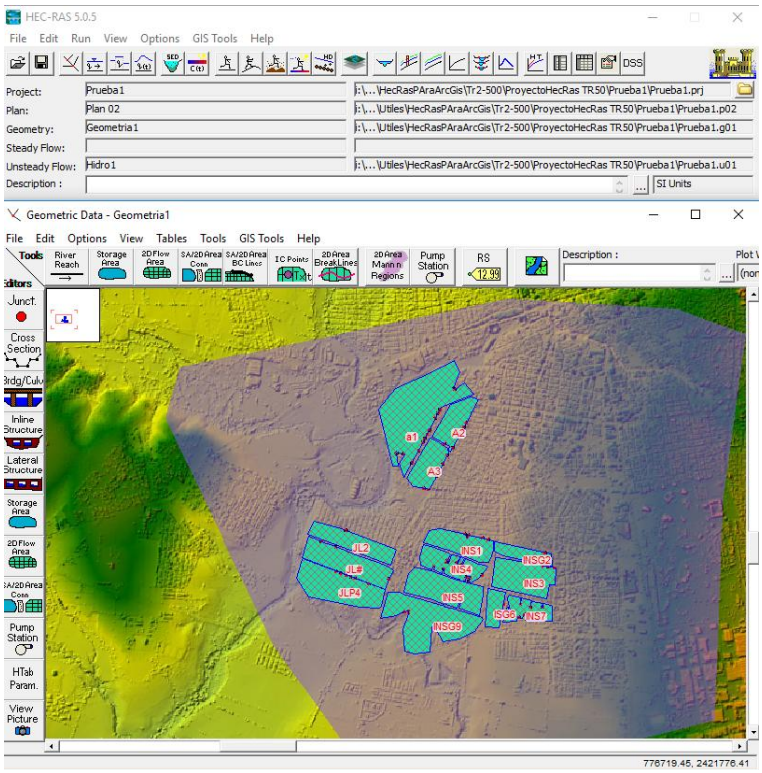


Figura 6.- Mallas bidimensionales en el modelo HECRAS

Mapas de peligro y severidad

El peligro se entiende como la probabilidad de excedencia asociada a la ocurrencia de una inundación, por lo que una representación de tal son los mapas de profundidades por periodo de retorno, lo mismo sucede con las velocidades de los escurrimientos, así mediante los resultados de las simulaciones, se generan los mapas de peligro.

En la Figura 7 se observa el mapa de tirante para un Tr de 1000 años que en este caso se consideró la situación más desfavorable que se presentó en la ciudad, en la simbología del mapa se encuentra una escala con diferentes tonos de azul que muestra en forma descendente la profundidad del tirante, en el tono más obscuro está la profundidad mayor y en tonos claros las profundidades menores. En la parte inferior del mapa se observan varias zonas con tirantes mayores a 2 m, esto es porque hay un río que pasa por la zona. Sin embargo, dentro de la ciudad se observan otras áreas con tirantes altos, debido a la topografía del lugar.

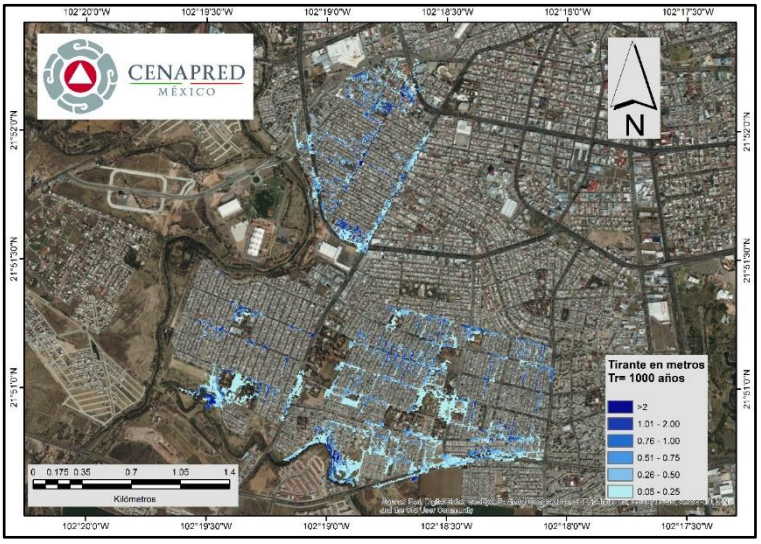


Figura 7.-Mapa de peligro por inundación (tirantes).

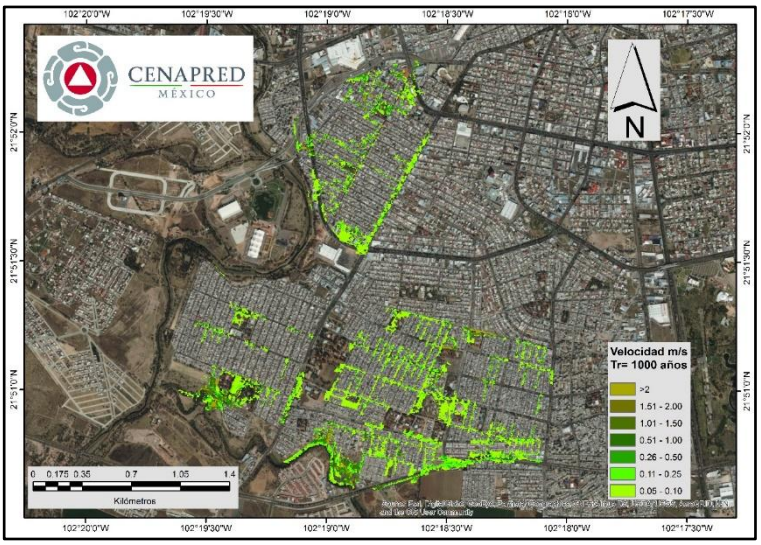


Figura 8.-Mapa de peligro por inundación (velocidades)

La severidad por inundación es una medida que resulta de la combinación de su profundidad y velocidad, que ayuda a cuantificar la fuerza del agua o resistencia al vuelco en cierto punto y que sirve para identificar la magnitud de una inundación, debido a que en México faltan estudios a detalle del efecto y magnitud de las inundaciones, se utiliza un nomograma obtenido del estudio del río Bielsdown en Nueva Gales, Australia, el cual atraviesa una localidad llamada Dorrigo.

En la Figura 9 se muestra dicho diagrama, el cual cuenta con una escala de colores que ayuda a generar mapas de severidad por inundación.

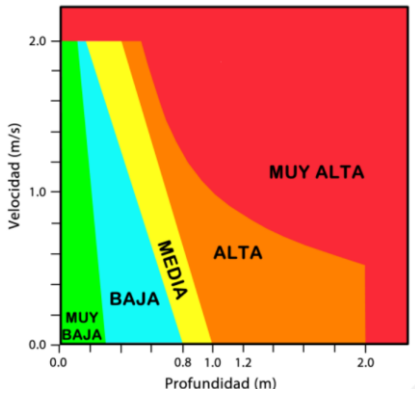


Figura 9.- Nomograma de severidad por inundación de Dorrigo

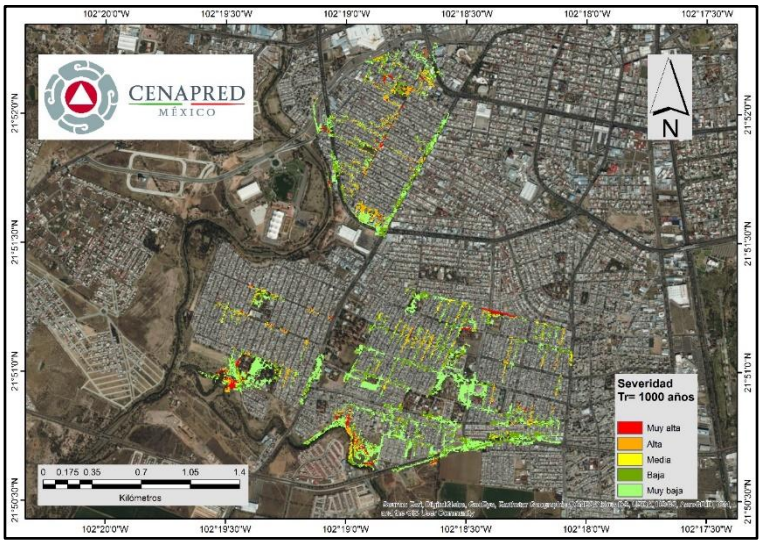


Figura 10.-Mapa de Severidad para un Tr de 1000 años

VULNERABILIDAD Y RIESGO POR INUNDACIÓN

Vulnerabilidad física

La vulnerabilidad física de las viviendas es una característica que permite identificar que tan susceptibles son éstas a sufrir daño ante una inundación u otro fenómeno. Para identificar la vulnerabilidad se siguió la clasificación y los tipos de vivienda que tiene el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) en México, según el tipo de material con el que están construidos los muros y techo. En las tablas 3 y 4 se muestra la clasificación resultante de las diversas combinaciones entre los distintos tipos de materiales de techos y muros en la vivienda.

Tabla 3.-Clasificación del tipo de vivienda según los materiales de muros y techo

COMBINACIÓN	TIPO DE VIVIENDA	COMBINACIONES ENTRE TIPO DE MATERIAL PARA EL TECHO Y PARA LOS MUROS
1	I	Vivienda con muros y techo de material de desecho
2	I	Vivienda con muros y techo de lámina de cartón
3	I	Vivienda con muros de lámina de cartón y techo de lámina de asbesto o metálica
4	II	Vivienda con muros de lámina de asbesto o metálica y techo de lámina de cartón
5	II	Vivienda con muros de carrizo, bambú o palma y techo de lámina de cartón
6	II	Vivienda con muros de carrizo, bambú o palma y techo de lámina de asbesto o metálica
7	II	Vivienda con muros de embarro o bajareque y techo de lámina de cartón
8	II	Vivienda con muros de embarro o bajareque y techo de lámina de asbesto o metálica
9	II	Vivienda con muros de embarro o bajareque y techo de palma, tejamanil o madera
10	II	Vivienda con muros de madera y techo de lámina de cartón
11	III	Vivienda con muros de madera y techo de lámina de asbesto o metálica
12	II	Vivienda con muros de adobe y techo de lámina de cartón
13	III	Vivienda con muros de adobe y techo de lámina de asbesto o metálica
14	III	Vivienda con muros de adobe y techo de lámina de palma, tejamanil o madera
15	III	Vivienda con muros de adobe y techo de lámina de teja
16	II	Vivienda con muros de tabique, ladrillo, block, piedra, cantera, cemento o concreto y techo de lámina de cartón
17	III	Vivienda con muros de tabique, ladrillo, block, piedra, cantera, cemento o concreto y techo de lámina de asbesto o metálica
18	III	Vivienda con muros de tabique, ladrillo, block, piedra, cantera, cemento o concreto y techo de palma, tejamanil o madera
19	III	Vivienda con muros de tabique, ladrillo, block, piedra, cantera, cemento o concreto y techo de teja
20	IV	Vivienda con muros de tabique, ladrillo, block, piedra, cantera, cemento o concreto y techo de losa de concreto, tabique, ladrillo o terrado con viguería

Tabla 4.- Clasificación de la vulnerabilidad según el tipo de vivienda

Tipo	Color	Vulnerabilidad
I	Rojo	Muy Alta
II	Naranja	Alta
III	Amarillo	Media
IV	Verde	Baja
V	Verde	Muy Baja

La elaboración del mapa de vulnerabilidad se realizó con la asignación de una clasificación con base en la tabla anterior y mediante el levantamiento de la vulnerabilidad física que se utilizó a partir de la herramienta Street View de Google Earth. Como se muestra en la figura 11, la mayoría de las viviendas resultaron con vulnerabilidad baja, y un porcentaje menor con vulnerabilidad media y sólo un punto con vulnerabilidad muy alta. Los puntos en color blanco son aquellos en los que no se obtuvo información, debido a que el sistema de Street View carecía de información o representaron terrenos baldíos.

Figura 11.- Mapa de vulnerabilidad física

ÍNDICE DE RIESGO

El índice de riesgo es la combinación del peligro y vulnerabilidad, tomando como parámetro principal el tirante de la inundación, se llevó acabo un cruce de la información de los tirantes de inundación para cada periodo de retorno y punto levantado de las casas. Para algunas viviendas no se les asignó ningún valor de tirante, ya que en algunas partes la mancha de inundación se encuentra alejada de la vivienda.

Después con base en las curvas de pérdida esperada de cada tipo de vivienda según la profundidad de inundación asigna un porcentaje. La fórmula que se utilizó para conocer el índice de riesgo de cada vivienda asociado a un Tr es:

$$R_j = C_j P(i) \cdot V_j Y_i$$

donde:

i; numerador para cada uno de los periodos de retorno analizados.
j; viviendas.
$P(i)$; función de peligro.
$V_j Y_i$; función de vulnerabilidad.

$$I_{R_j} = \frac{R_j}{C_{MAX}}$$

donde:

R_j; valor de los bienes expuestos
C_{MAX} ; máximo valor del bien expuesto dentro de la localidad.

Los rangos para caracterizar e índice de riesgo son:

$0.67 < I_R < 1.0$; Alto
$0.33 < I_R < 0.67$; Medio
$< I_R < 0.33$; Bajo

La tabla muestra la probabilidad de la función de peligro para cada periodo de retorno

Tabla 5.- Función de peligro.

Intensidad i (no.)	Tr(i) (años)	P(i)
1	2	0.60
2	5	0.20
3	10	0.12
4	25	0.04
5	50	0.02
6	100	0.012
7	250	0.004
8	500	0.002
9	1000	0.001
10	2000	0.0006

Finalmente, al índice de riesgo (IR) se le asignó un color para poder representar el riesgo por inundación, como se muestra en la figura 12.

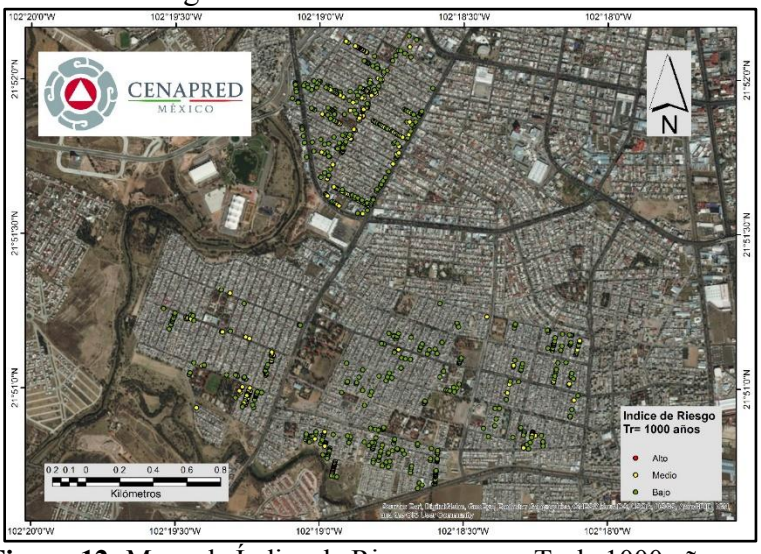


Figura 12.-Mapa de Índice de Riesgo para un Tr de 1000 años

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Al realizar un análisis hidrológico e hidráulico para una ciudad es muy importante contar con información suficiente y de calidad. Uno de los principales insumos es el Modelo

Digital de Elevación por lo que es recomendable hacer un estudio para contar con material de excelente resolución, y así obtener buenos resultados.

- La modelación de alcantarillado ofrece un escenario realista de inundación pluvial, tomarlo en cuenta es de vital importancia, ya que permite conocer qué cantidad de agua se absorbe y desaloja durante una lluvia intensa.
- Es necesario continuar con los estudios de vulnerabilidad física de la vivienda ante un evento de inundación, así como estimar el daño esperado de dicho fenómeno. Con ello, se elaborarán mapas de riesgo, que suelen ser útiles para los tomadores de decisiones, y una gran herramienta de trabajo para las autoridades de Protección Civil, ya que pueden generarse acciones como, planes de emergencia y medidas de mitigación que disminuyan los daños.

REFERENCIAS

Aparicio Mijares, F. J., (2013): Fundamentos de hidrología de superficie, Limusa, México, pp. 20-21, 140, 188, 206, 233-234.

Campos Aranda, Daniel, (2010): *Intensidades máximas de lluvia para diseño hidrológico urbano en la República Mexicana, Ingeniería Investigación y Tecnología (FI UNAM)*, Vol. LXI, núm. 2, pp. 179-188.

CENAPRED, (2016): *Características e impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en la República Mexicana en el año 2011*, México, pp. 7.

CENAPRED, (2006): *Guía Básica para la Elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos*, México.

Coordinación Estatal de Protección Civil Aguascalientes. (2017): *Archivo digital con registros de casos de inundaciones en la ciudad de Aguascalientes*, Aguascalientes. Archivo interno.

Coordinación Estatal de Protección Civil Aguascalientes. (2017): *Archivo digital del sistema de alcantarillado de la zona urbana de Aguascalientes*, Aguascalientes. Archivo interno.

Escobar, A, (2004): *Desastres agrícolas en México: Catálogo Histórico,* Fondo de Cultura Económica, volumen 2, México, pp. 93, 99, 134 y 159.

Salas Salinas, Marco Antonio. *Metodología para la elaboración de mapas de riesgo por inundaciones en zonas urbanas*., (2011), Sistema Nacional de Protección Civil Centro Nacional de Prevención de Desastres, México, D. F., 70 pp.

IAHR **AIIH**

XXVIII CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA
BUENOS AIRES, ARGENTINA, SEPTIEMBRE DE 2018

MODELO CONCEPTUAL DE PRONÓSTICO PARA LA OPERACIÓN DEL SISTEMA DE DRENAJE DEL VALLE DE MÉXICO

Guillermo Leal Báez
Académico Titular de la Academia de Ingeniería México A.C.
Inesproc S.A. de C.V.
Calle Santa Catalina 318, Col. Insurgentes San Borja, Del. Benito Juárez, C.P. 03100, CDMX, México
guillermo.leal@inesproc.mx

RESUMEN:

El sistema de drenaje de la Ciudad de México es sumamente complejo operativa y administrativamente; requiere de la coordinación de distintas instituciones de los gobiernos Federal, de la Ciudad de México y del estado de México. Con el propósito de lograr el adecuado desalojo de las aguas, principalmente en temporada de lluvias, las instituciones han establecido un protocolo de operación conjunta; sin embargo, aún es necesario crear una plataforma única de control y encontrar una solución para operar el sistema de manera anticipada a los eventos pluviales, lo que llevará muchos años y necesitará de inversiones importantes en recursos humanos y económicos.

La propuesta que en este documento se presenta, expone una solución de corto plazo al problema específico de la operación del sistema, visto como un elemento único que dependa de un solo operador. Se basa en la creación de un modelo conceptual, que integra los resultados de simulaciones hidráulicas previamente ejecutadas para distintas lluvias teóricas e históricas. Ante la ocurrencia de un evento, el modelo tendría como entradas la altura de precipitación, la duración de la tormenta y la zona de incidencia de la lluvia, y como salida, la política de operación a implementar para disminuir el peligro de desbordamientos.

ABSTRACT:

The drainage system of Greater Mexico City is, by all means, complex both in its operations and its administratively nature. It requires cooperation of many involved entities of the federal and local government from Mexico City and the State of Mexico. The main goal of this action is to remove rain water from the city, mostly in the rain season. That is why government entities have stablished operation protocols, but we still find on top of the needs, to create one single system that will take care of the rainfall events before it even strikes. Acknowledging that this will mean an important inversion, both in human and economic resources.

The proposal exposed in this document shows a short-term solution to that specific problem detected in the operation system, which should be seen as an independent agency that should rely on one operator. This proposal finds its way into the creation of a Conceptual Model that will deliver accurate results of hydraulic simulations already executed, covering theoretical and historical rainfalls. Facing the occurrence of an event, this model will work only with the rain characteristics (rain height, duration and incidence zone) and will show the best operating policies in order to decrease flood hazard.

PALABRAS CLAVES: Drenaje de la Ciudad de México, modelación hidráulica, optimización de políticas de operación.

INTRODUCCIÓN

La sostenibilidad de la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) radica, principalmente, en garantizar su seguridad hídrica; es por ello que, una parte importante de los recursos técnicos y económicos del Estado se destina a proporcionar los servicios de abastecimiento de agua potable, drenaje y saneamiento. En este sentido, el abastecimiento de agua potable representa uno de los mayores retos a resolver en el valle; sin embargo, existe otro problema poco observado por la población, que incide directamente en la salud pública, la conservación del medio ambiente, la infraestructura, el equipamiento urbano y, sobretodo, en la calidad de vida y la seguridad de los mexicanos que habitan esta región. Este problema es la planeación, diseño, construcción, operación, mantenimiento y conservación del sistema de drenaje sanitario y pluvial de la ciudad.

El sistema de drenaje de la Ciudad de México es sumamente complejo operativa y administrativamente; requiere de la coordinación de los gobiernos Federal, de la Ciudad de México y del estado de México. Con el propósito de lograr el adecuado desalojo de las aguas, principalmente en temporada de lluvias, las instituciones involucradas han establecido políticas de operación a través del "Protocolo de operación conjunta para la atención de fenómenos hidrometeorológicos en la zona metropolitana" (Conagua y GDF, 2013). Los criterios dictados por el Protocolo, sin duda han sido de gran utilidad y han reducido en gran medida el peligro de desbordamiento de conductos o fallas de la infraestructura, así como afectaciones a las personas y sus bienes; sin embargo, estos lineamientos son susceptibles de mejorarse, dado que la mayoría de sus reglas se derivan de la experiencia en campo, obtenida del manejo de las aguas a través de muchos años de operar el sistema; sólo algunas de ellas han sido obtenidas de estudios integrales de funcionamiento hidráulico, realizados mediante la implementación de modelos de simulación hidráulica.

Por lo anterior, desde hace muchos años, se han puesto en marcha diversas acciones, cuyo propósito es contar con una red completa de monitoreo que permita concentrar y procesar la información en un centro de control. De manera que, mediante la implementación de un modelo de simulación hidráulica, se modele en tiempo real el funcionamiento hidráulico; o incluso, se pueda pronosticar su funcionamiento a través del procesamiento de los datos generados por radares meteorológicos. Resolver esta situación llevará muchos años y necesitará de importantes inversiones, un modelo de simulación hidráulica operado en tiempo real, la automatización de estructuras especiales y su correspondiente sistema de operación remota.

En el presente trabajo se expone una solución de corto plazo al problema específico de la operación del sistema, visto como un elemento único que dependa de un solo operador. Se plantea una metodología mediante la cual sea posible contar con escenarios muy parecidos a los que se obtendrían como resultado de simular lluvias registradas en tiempo real (utilizando datos de estaciones pluviográficas e hidrométricas), o bien, de simular lluvias estimadas (utilizando datos de radares).

Para ello se propone la conformación de una base de datos que almacene resultados de simulaciones hidráulicas (previamente ejecutadas y analizadas) para diferentes condiciones de lluvia y distintas políticas de operación que, de acuerdo con lluvias registradas o teóricas, representen la lluvia esperada y el posible funcionamiento hidráulico del sistema, para así determinar cuál sería la mejor política de operación a implementar.

El objetivo es que, antes de que incida una tormenta en la ZMVM, o cuando ésta apenas comience, se pueda contar con:

- Una buena aproximación del funcionamiento hidráulico del sistema, ante cualquier tormenta que lo ponga en riesgo.
- Los elementos suficientes para seleccionar la mejor alternativa de operación, con el fin de disminuir el peligro de desbordamientos o fallas en el sistema.
- El tiempo suficiente para transmitir las instrucciones necesarias para operar las estructuras estratégicas, de acuerdo con la política seleccionada.

- La posibilidad de enviar los cuerpos de emergencia con anticipación a los sitios o estructuras susceptibles de falla, para hacerle frente a cualquier eventualidad.

EVOLUCIÓN DEL SISTEMA DE DRENAJE DE LA ZMVM

Desde su fundación, como México Tenochtitlán al suroeste del antiguo lago de Texcoco, la Ciudad de México siempre ha sido una de las metrópolis más pobladas del mundo. Se estima que a la llegada de los españoles contaba con una población de 200 a 500 mil habitantes. Actualmente, con base en la Encuesta Intercensal 2015, la Ciudad de México y su zona conurbada (que conforman la Zona Metropolitana del Valle de México, ZMVM) cuentan con 20 892 724 habitantes y una superficie de 7 866.1 km^2 (INEGI et al., 2012).

Aunados a la problemática poblacional, se encuentran los inconvenientes generados por la propia ubicación geográfica de la ciudad. Ésta se localiza a 2 240 msnm, dentro de una cuenca endorreica, lo cual significa que, además de tener graves problemas de disponibilidad del recurso agua, también existe un gran problema con el desalojo de las aguas servidas pero, sobre todo, de las pluviales que se precipitan en una zona de alta incidencia de tormentas convectivas torrenciales; aguas que antiguamente alimentaban los cinco grandes lagos del Valle de México (Xaltocan, Zumpango, Texcoco, Chalco y Xochimilco), pero que hoy representan una grave amenaza de inundaciones y daños a la infraestructura urbana, a la población y a sus bienes (Figura 1).

Figura 1.- Comparación de áreas ocupadas por cuerpos de agua, antes de la llegada de los españoles y en la actualidad.

Lo anterior ilustra porqué la Ciudad de México siempre se ha encontrado expuesta al peligro de grandes inundaciones y porqué la ocurrencia de éstas ha estado tan íntimamente ligada a la evolución del sistema de drenaje. Desde su época colonial, se han construido distintas obras hidráulicas para disminuir el riesgo ante inundaciones; entre las que destacan las salidas artificiales por las cuales se drena la cuenca. La primera salida artificial fue el Tajo de Nochistongo, cuya construcción inició en 1607 y duró casi 200 años. Cuando finalmente terminaron las obras del Tajo, la ciudad volvía a sufrir inundaciones cada vez más frecuentes, por lo que en 1865 se decidió construir el Gran Canal del Desagüe (GCD), que fue inaugurado en 1900 y hasta la actualidad es uno de los conductos principales del sistema de drenaje superficial de la ZMVM, con una longitud de 47.5 km más 10 km de túneles.

Sin embargo, estas obras apenas tenían la capacidad adecuada para las condiciones de la cuenca a principios del siglo XX, cuando la ciudad contaba con menos de medio millón de habitantes. Por otro lado, en 1925 se descubrió que los hundimientos del suelo, producto de la explotación de los acuíferos, provocaban la pérdida de pendiente de los conductos de drenaje. Por lo anterior, en los años 60 se construyeron el Interceptor del Poniente (IP) y el Emisor del Poniente (EP), que contribuyen a drenar las avenidas provenientes de los ríos del poniente de la ciudad; mientras que, en 1975 se inauguró el Drenaje Profundo, conformado por los Interceptores Oriente y Central (IO e IC, de 8 y 10 km de longitud y una capacidad de 100 m^3/s) que confluyen en el Emisor Central (EC): un túnel de 50 km de longitud, 6.5 m de diámetro y 200 m^3/s de capacidad,

desplantado a una profundidad que varía entre 50 y 237 m. Actualmente se construye el Túnel Emisor Oriente (TEO), cuarta salida artificial, con de 62 km de longitud, 7.5 m de diámetro y una profundidad entre 55 y 150 m.

SITUACIÓN ACTUAL

Sistema funcional

Además de las grandes obras hidráulicas que constituyen las cuatro salidas de la cuenca, el drenaje se complementa con un complejo sistema de cauces, canales, colectores, túneles semiprofundos y profundos, plantas de bombeo, presas y lagunas de regulación, así como un sinnúmero de estructuras de captación y control. Es por ello que el sistema de drenaje de la Ciudad de México es uno de los más complejos a nivel mundial, en todos los aspectos.

En este sentido, el funcionamiento del sistema se separa básicamente en dos condiciones: en época de estiaje y en temporada de lluvias.

Durante el estiaje se emplean todos los sistemas de colectores y plantas de bombeo que descargan a los cauces, canales y conductos superficiales que conducen las aguas hasta el GCD y el EP. Esta operación permite dar el mantenimiento preventivo y correctivo a los túneles profundos y sus correspondientes captaciones, estructuras de control y de derivación para su correcta operación.

Por otra parte, en temporada de lluvias se utiliza principalmente el sistema de drenaje profundo y el sistema de presas del poniente, así como los lagos y lagunas de regulación (ubicadas en el sur, norte y oriente de la ciudad). Con esta operación, la salida de las aguas se realiza mediante el EP y el EC; sin embargo, cuando los conductos antes mencionados se ven comprometidos en su operación, se utiliza como apoyo el GCD y todos los elementos del sistema superficial. En el corto plazo se tendrá en operación el TEO, que permitirá alternar la operación del desagüe de la cuenca a través del sistema profundo, utilizando en algunas ocasiones el EC y en otras el TEO.

Sistema estructural

El sistema de drenaje de la Ciudad de México no es complejo únicamente en su infraestructura, sino también en su administración y operación. La interconexión que existe entre la mayoría de los elementos del sistema de drenaje, aunada a su extensión, provoca que su manejo requiera de la operación coordinada de distintas instituciones; dado que aún no existe un organismo en operaciones que gestione, por completo y de forma integral, el agua de la cuenca del Valle de México.

Con el fin de aumentar la efectividad del sistema de drenaje, desde hace años se han creado distintos órganos y convenios entre los gobiernos Federal, de la Ciudad de México y del estado de México. Entre ellos, en 2014, se estableció el Convenio para la instalación de la Comisión Metropolitana de Drenaje, entre cuyos objetivos está el "planear, operar, mantener y conservar de manera coordinada la infraestructura metropolitana para el desalojo de avenidas y corrientes pluviales, contenida dentro del *Protocolo de operación conjunta para la atención de fenómenos hidrometeorológicos en la zona metropolitana* (al que en adelante se hará referencia como Protocolo de Operación conjunta o Protocolo).

Protocolo de Operación Conjunta

Éste es el documento oficial que define, de manera concreta y precisa, el momento y la manera en que se deben operar las 26 estructuras estratégicas del sistema de drenaje y supone tres condiciones:

1) Sin lluvia o con lluvia ligera.
2) Con lluvia intensa.
3) Vaciado del sistema.

Cabe aclarar que el Protocolo se revisa y, si es necesario, se modifica, con cierta periodicidad; asimismo, se modifica de manera extraordinaria, cada vez que se encuentra una mejor manera de operar el sistema o cuando éste sufre modificaciones importantes.

Estructuras y conductos involucrados

La condición más importante del protocolo es la que rige la operación del sistema en temporada de lluvias; por lo que se determinó, con base en la experiencia de operación, que dentro del sistema existen 26 estructuras estratégicas, ubicadas en distintas zonas de la ciudad, que deben operarse de forma coordinada para lograr un adecuado desalojo de las aguas (Figura 2).

Red de monitoreo de lluvia

En la ZMVM existe una red de estaciones pluviográficas que se encuentran desde hace muchos años en operación continua y están ligadas a un sistema de monitoreo en tiempo real. Con esta red de monitoreo es posible contar con datos históricos de alturas de precipitación, así como conocer la distribución temporal y espacial de cada tormenta que se presenta en el valle.

De los estudios que se han realizado a partir de los datos de las estaciones, se ha determinado que una lluvia generalizada en el valle, con una altura promedio de 8 mm precipitados en 6 horas o menos, puede provocar desbordamientos o fallas importantes en conductos o estructuras.

Dado que el parámetro que determina la aplicación del Protocolo es la intensidad de lluvia, ésta se monitorea en tiempo real a través de 29 estaciones de la red de la ZMVM, seleccionadas por su posición estratégica (Figura 2).

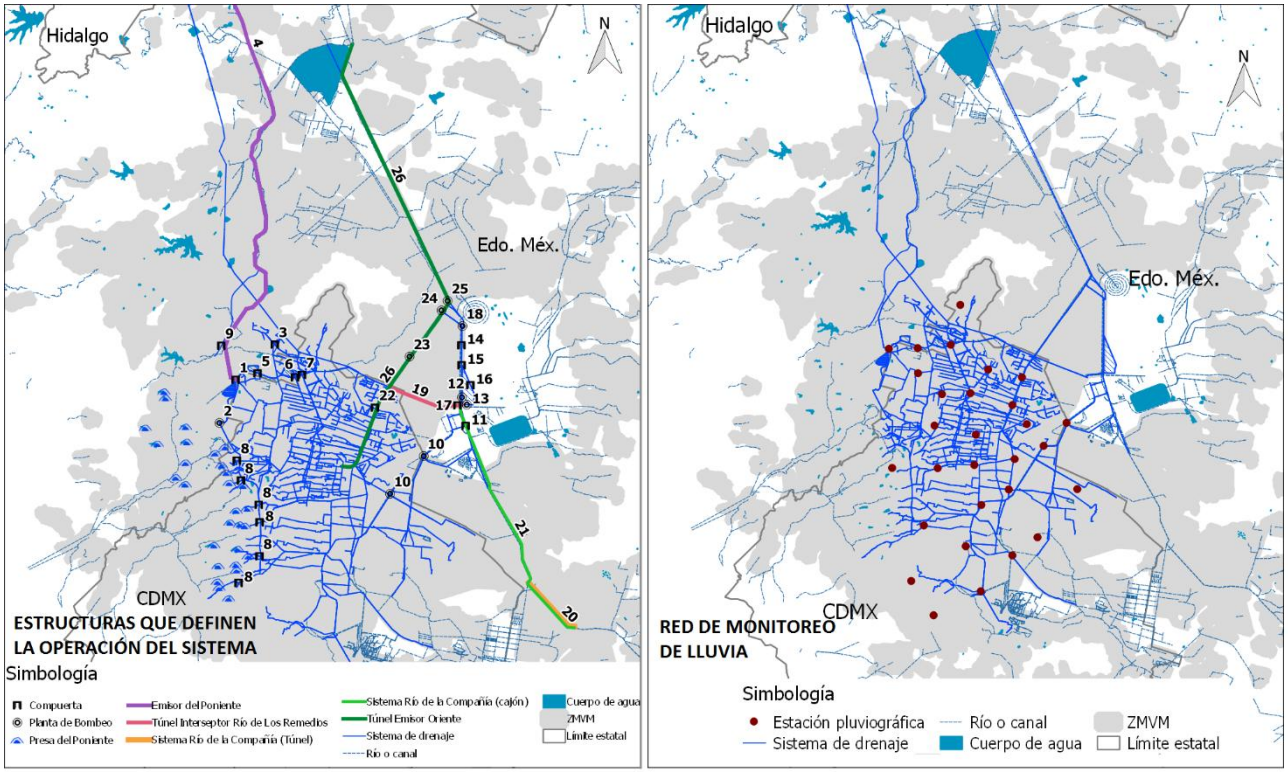


Figura 2.-Estructuras estratégicas y estaciones pluviográficas que determinan la aplicación del Protocolo.

Observaciones

El Protocolo plantea que la operación para la condición de lluvia importante debe iniciar cuando la lluvia promedio, registrada en las 29 estaciones pluviográficas observadas, sea igual o mayor a 8 mm, acumulados en las últimas 6 horas de la tormenta.

Este criterio de aplicación ha dado buenos resultados a lo largo de los últimos años; sin embargo, el criterio no distingue si, por ejemplo, la lluvia está concentrada en el poniente mientras que en el oriente no se registra precipitación. En este caso, para alcanzar los 8 mm de lluvia promedio y detonar la aplicación del Protocolo para lluvias importantes, sería necesario que en el

poniente la altura de precipitación fuera mucho mayor. Esto implica que se corre el riesgo de no alcanzar el promedio que detonaría la operación para lluvias importantes aun cuando la infraestructura en el poniente se encuentre totalmente rebasada en su capacidad, con la posible consecuencia de causar daños a la infraestructura y a la población de la zona.

Por otro lado, si bien es cierto que ya está estudiado y comprobado que una lluvia de 8 mm sobre la ZMVM provoca problemas en el sistema principal de drenaje y, por lo tanto, esta altura de lluvia detona la aplicación del Protocolo bajo la condición de lluvia importante; también es cierto que existe una diferencia significativa en la distribución temporal de la lluvia; es decir, ni la altura de lluvia ni el volumen de agua precipitado es el mismo para una lluvia que acumula 8 mm en una hora, que la altura y el volumen de una lluvia que los acumula en 6 horas.

AUTOMATIZACIÓN DEL SISTEMA DE DRENAJE DE LA ZMVM

El avance de la tecnología y los sistemas computacionales ha permitido el desarrollo de los instrumentos de medición hidrológicos y meteorológicos. En este sentido, algunas ciudades alrededor del mundo han adoptado diversas tecnologías para mejorar la gestión de sus recursos hídricos.

En el caso de la ZMVM, se ha trabajado durante años para conservar e incrementar el número de estaciones pluviográficas, rehabilitar y modernizar estaciones hidrométricas e instalar radares meteorológicos. Estas acciones tienen el propósito de conformar una red de monitoreo completa del Valle de México, cuya información se pretende concentrar y procesar en un centro de control único para alimentar un modelo de simulación hidráulica que, en tiempo real, simule el funcionamiento hidráulico esperado del sistema; de esta manera, podrían detectarse puntos críticos y buscar a tiempo una política de operación que reduzca el peligro de falla o desbordamiento de las estructuras.

Un objetivo más ambicioso es aumentar el margen de tiempo para actuar y operar adecuadamente el sistema; para ello se contempla emplear la información generada por los radares meteorológicos. De este modo, se contaría con mayor tiempo para analizar el comportamiento del sistema de drenaje bajo diferentes condiciones de operación y determinar cuál sería la mejor política a implementar o identificar qué acciones inmediatas se requieren.

Por otra parte, para completar el sistema de control único, se considera la posibilidad de automatizar la operación de las estructuras estratégicas del sistema. De este modo, con base en los resultados de las simulaciones y las políticas de operación previamente definidas, se enviarían de forma automática las señales de encendido y apagado a los equipos de bombeo; así como las de apertura y cierre a las compuertas. Lo anterior implicaría un estudio previo minucioso del funcionamiento del sistema de drenaje bajo diferentes condiciones de lluvia, con el fin de analizar, evaluar y validar las políticas de operación del Protocolo.

Problemática de un modelo en tiempo real

A pesar de los esfuerzos, aún no se ha logrado tener un sistema de medición de lluvia y de caudales que sea cien por ciento estable y que cubra por completo tanto la ZMVM, como las zonas altas que la rodean. Tampoco se ha logrado instrumentar en su totalidad los elementos del sistema de drenaje de manera que los datos obtenidos por sensores describan por completo el estado del sistema. Asimismo, hace falta un sistema central que reciba toda la información de lluvia, escurrimientos y niveles; además de la infraestructura y recursos necesarios para el procesamiento de dicha información.

Los principales factores que dificultan lograr un sistema automatizado para la ZMVM son:

- La configuración topográfica e hidrológica. Se encuentra dentro de una cuenca endorreica, donde antiguamente se formaban cinco lagos que fueron desecados y sus únicas salidas son artificiales.
- La población a la que sirve. Tiene una población de más de 20 millones de habitantes.

- La extensión de la ciudad. Ocupa una superficie de casi 7 900 km^2.
- Las condiciones geotécnicas. Al estar construida sobre un terreno lacustre, cuenta con una particularidad importante: el hundimiento de la ciudad. El sistema de drenaje superficial pierde capacidad año con año debido a la velocidad de hundimiento del suelo, que en algunas zonas alcanza hasta 40 cm/año. Esto obliga a complementar el sistema con grandes plantas de bombeo.

MODELO CONCEPTUAL

Al considerar lo siguiente: en primer lugar, la implementación de un sistema automatizado y la creación de un centro de control único, desde el cual se pueda manejar el sistema de drenaje de manera remota y con datos tomados en tiempo real o pronosticados, llevará varios años; en segundo lugar, para lograrlo será necesaria una inversión económica muy importante, tanto inicial como para su conservación y mantenimiento; en este documento se plantea un Modelo Conceptual menos complejo y costoso, que mejore y vuelva más eficiente el manejo conjunto el drenaje de la ZMVM.

La propuesta, en general, consiste en lo siguiente y consta de dos etapas:

1) *Conformación de la base de datos.* Crear una base de datos con la información y resultados de un gran número de simulaciones hidráulicas del sistema de drenaje; las cuales se realizarían para distintas combinaciones de lluvias (considerando su altura, duración y zona de incidencia) y políticas de operación, que podrían ser las definidas por el Protocolo, o bien, considerando modificaciones a éste que mejoren su eficiencia.
2) *Uso de la base de datos.* Al presentarse un evento de lluvia, consultar la base de datos creada previamente para conocer el funcionamiento del sistema de drenaje bajo las condiciones de la lluvia monitoreada en tiempo real o pronosticada, así como la mejor política de operación para evitar desbordamientos, reduciendo con ello el peligro de inundación.

ETAPA 1: MODELACIÓN DEL SISTEMA DE DRENAJE DE LA ZMVM

Objetivos

- Emplear un modelo matemático para simular el funcionamiento del sistema principal de drenaje de la ZMVM, bajo distintas condiciones de lluvia y políticas de operación, de manera que sea posible detectar las lluvias que ponen en peligro de desbordamiento al sistema de drenaje, los elementos críticos bajo dichas lluvias y la mejor política de operación.
- En caso de que bajo la política definida actualmente por el Protocolo no se logre el adecuado funcionamiento de todo el sistema, hacer las modificaciones, simulaciones y análisis necesarios hasta encontrar la política que reduzca el peligro de inundaciones lo más posible.
- Con los datos y resultados de todas las simulaciones elaboradas, crear una base de datos para emplear en la Etapa 2.

Metodología

Se requiere construir un modelo matemático capaz de simular el funcionamiento del sistema principal de drenaje de la Ciudad de México. Este modelo deberá poder ser modificado para simular distintas lluvias y políticas de operación. Para ello se sugiere la siguiente metodología:

1. Recopilar toda la información necesaria para la representación, de las estructuras que conforman el sistema principal de drenaje.
2. En el modelo de simulación hidráulica, ingresar la información recopilada en el punto anterior, con el fin de armar un modelo que represente la infraestructura del sistema de drenaje.

3. Realizar análisis hidrológicos para determinar las lluvias con mayor probabilidad de ocurrencia en la Ciudad de México, considerando tres tipos de lluvia:
    - Lluvias generalizadas (en toda la ZMVM).
    - Lluvias concentradas (considerando las zonas: poniente, oriente, centro, sur y norte).
    - Lluvias históricas que han causado problemas en el sistema de drenaje.
4. Calcular los hidrogramas de cuenca propia de las subcuencas de la Ciudad de México, para cada una de las lluvias definidas en el punto anterior (en la Figura 3 se muestra la división de la cuenca en 290 subcuencas, considerando la operación del sistema en temporada de lluvias),

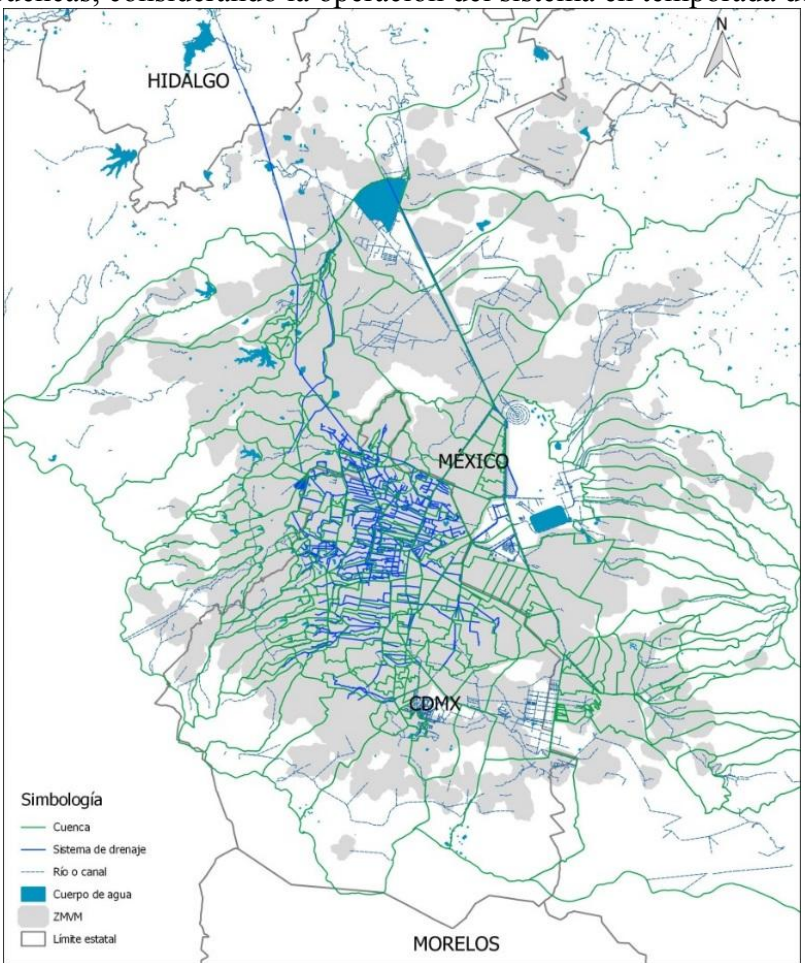


Figura 3.- Subcuencas definidas para la operación del sistema de drenaje en temporada de lluvias.

5. Armar un modelo específico para cada una de las condiciones de lluvia a simular. Esto significa que cada una de las simulaciones hidráulicas tendrá asociadas las siguientes características:
    - La altura de precipitación (hp) de la lluvia en estudio.
    - La duración de la tormenta (d).
    - El área de incidencia de la lluvia.
    - La política de operación implementada.
6. En cada uno de los armados, y de acuerdo con las condiciones definidas en el Protocolo, introducir las políticas de operación correspondientes a cada lluvia a simular. Para lo cual se debe considerar que la política de operación se define por las características de la lluvia, de modo que, puede corresponder a: la operación en estiaje; la operación sin lluvia o con lluvia ligera; la operación con lluvia importante; y, por último, la condición de vaciado.
7. Realizar la simulación hidráulica de cada armado.
8. Analizar los resultados obtenidos en cada armado; es decir, para cada combinación de condición de lluvia y política de operación es necesario revisar los resultados: perfiles hidráulicos, hidrogramas transitados en puntos estratégicos del modelo, hidrogramas en estaciones de bombeo, velocidades de flujo y, en general, la capacidad de la infraestructura para conocer, a priori, el funcionamiento hidráulico esperado; el propósito es detectar puntos críticos en el

sistema de drenaje en cada uno de los armados. En este punto se pueden presentar tres condiciones:

- La tormenta en análisis no provoca problemas en ningún conducto ni estructura especial; entonces, se ratifica la política de operación empleada en dicha simulación.
- La tormenta en análisis provoca problemas al menos en uno de los elementos del sistema. En este caso, será necesario modificar la política de operación y realizar una nueva simulación. Este proceso se repite hasta encontrar una política de operación que elimine el o disminuya el peligro de desbordamientos de los conductos o mal funcionamiento de estructuras especiales.
- Si ya se realizaron suficientes simulaciones para argumentar técnicamente que no existe una forma de operar el sistema que resuelva por completo el adecuado desalojo de las aguas, se debe elaborar un documento que explique esta situación y seleccionar de todas las simulaciones realizadas, aquella que reduzca el peligro lo más posible.

9. En cualquiera de los casos anteriores, almacenar los resultados en la base de datos: perfiles hidráulicos de las principales estructuras, hidrogramas transitados en puntos estratégicos, tablas de resultados principales, etc.; acompañados en un documento que describe las condiciones de lluvia y políticas de operación simuladas.
10. En caso de que se hayan detectado problemas en el sistema de drenaje, hacer las modificaciones que se consideren pertinentes en el Protocolo, con el fin de encontrar una política de operación que evite inundaciones y fallas en el sistema.
11. Realizar la simulación con las políticas de operación modificadas; analizar los resultados y determinar si mejora o no el funcionamiento del sistema de drenaje. Almacenar los datos.
12. Repetir el paso anterior hasta encontrar una política de operación que permita desalojar los escurrimientos adecuadamente; o bien, hasta que se tengan los suficientes argumentos técnicos para determinar que bajo dicha condición de lluvia no existe una política de operación que resuelva por completo el adecuado funcionamiento del sistema. Si este último es el caso, definir cuál fue la mejor política de operación.
13. Organizar y estructurar la base de datos con los resultados e información recopilada durante el proceso anterior.

Para aclarar el procedimiento a seguir en esta etapa del proyecto, se presenta la Figura 4, que muestra el diagrama de flujo de las acciones a ejecutar para conformar la base de datos.

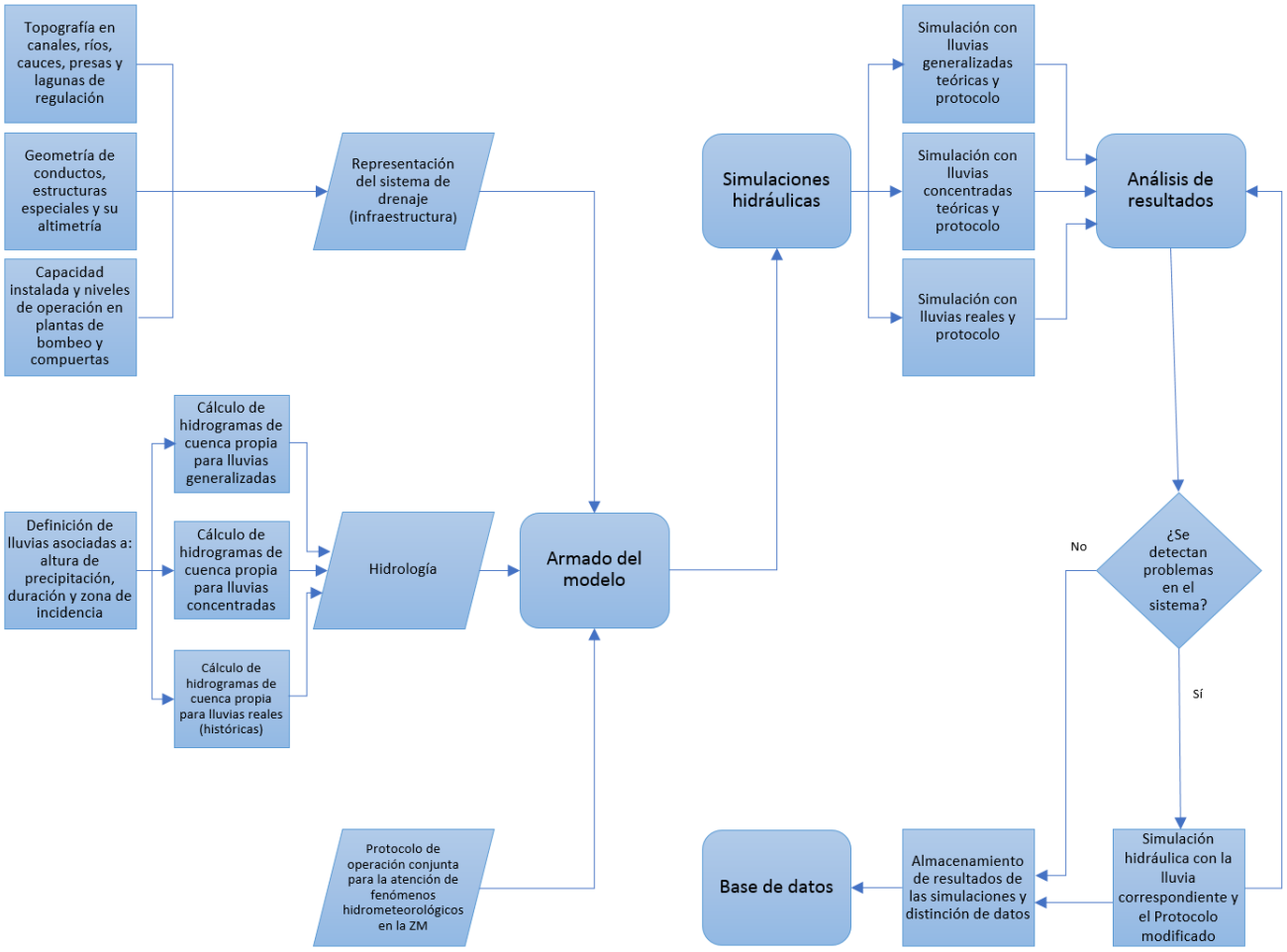


Figura 4.- Diagrama de flujo para crear la base de datos conformada por resultados de simulaciones con lluvias teóricas e históricas (Etapa 1 del Modelo Conceptual).

ETAPA 2: OPERACIÓN DEL SISTEMA DE DRENAJE USANDO LA BASE DE DATOS

Objetivo

- Emplear la base de datos construida en la Etapa 1 del proyecto para conocer el funcionamiento hidráulico esperado para una determinada lluvia (estimada o real), así como la mejor política de operación para enfrentarla.

Metodología

La base de datos creada en la Etapa 1 se empleará de la siguiente forma:

1. Obtener los datos de la lluvia que se desea revisar, por cualquiera de los siguientes medios:
   - Estaciones pluviográficas monitoreadas en tiempo real. Permiten dar seguimiento a una lluvia desde su inicio.
   - Radares meteorológicos. Permiten pronosticar en dónde se presentará una lluvia y estimar su magnitud. En este caso se cuenta con aun más tiempo para actuar conforme a la lluvia que se espera.
2. La base de datos desplegará los expedientes correspondientes a una lluvia al ingresar los siguientes datos:
   - Altura de precipitación (hp).
   - Duración (d).
   - Zona de incidencia.
3. Al realizar una consulta se visualizará lo siguiente:

- La simulación o el grupo de simulaciones correspondientes a los datos de lluvia ingresados.
- Los expedientes de cada una de las simulaciones asociadas a dicha lluvia, con los documentos descriptivos y de resultados.
- Si se trata de una sola simulación, estará identificada como "Solución única" (correspondería a las políticas de operación del Protocolo original). Si es un grupo de simulaciones, se podrán tener los siguientes tipos:
    a) *Solución modificada*. Corresponde a la simulación que proporciona una solución después de modificar las políticas de operación del Protocolo.
    b) *Funcionamiento inadecuado*. Aquellas simulaciones con las que no se logró desalojar adecuadamente los escurrimientos; dentro de éstas estaría la correspondiente a las políticas de operación del Protocolo y, en su caso, las correspondientes al proceso iterativo que se siguió hasta encontrar la solución final (Solución modificada).
    c) *Condición de alerta*. Corresponde a la política de operación que reduce al mínimo el peligro de desbordamiento o mal funcionamiento, en el caso de que no exista una política que solucione por completo el funcionamiento del drenaje para la lluvia simulada.
- Los archivos de resultados generados por cada simulación. Es decir, no solo podrán consultarse los documentos descriptivos y de resultados, sino también, los archivos de resultados que genera el software, con el objetivo de poder consultar perfiles hidráulicos, hidrogramas, gráficas, etc. de elementos de drenaje que no fueron considerados necesarios para la toma de decisiones. Asimismo, podrán emplearse estos archivos para visualizar y crear animaciones del funcionamiento hidráulico de cualquier elemento de drenaje, con el fin de analizar efectos transitorios o comparar la evolución de los niveles del agua asociados a un hidrograma en cualquier nodo del sistema.

4. En caso de que exista una solución para el adecuado desalojo de las aguas, ya sea con base en el Protocolo o modificándolo, se deberán transmitir las acciones a realizar a los operadores de las estructuras de control y plantas de bombeo, para lo cual se empleará cualquiera de los medios de comunicación disponibles (radio, internet, etc.).
5. Si la tormenta en análisis provoca fallas por falta de capacidad en los conductos o estructuras especiales y, por lo tanto, no existiera en la base de datos una política de operación que resuelva el adecuado desalojo de las aguas, se tendrá que alertar a las instituciones correspondientes, para que envíen con anticipación brigadas de emergencia que puedan realizar procedimientos en campo que mitiguen los daños y, si es necesario, inicien el desalojo de personas en la zona.

En la Figura 5 se muestra el diagrama de flujo correspondiente a esta etapa del proyecto.

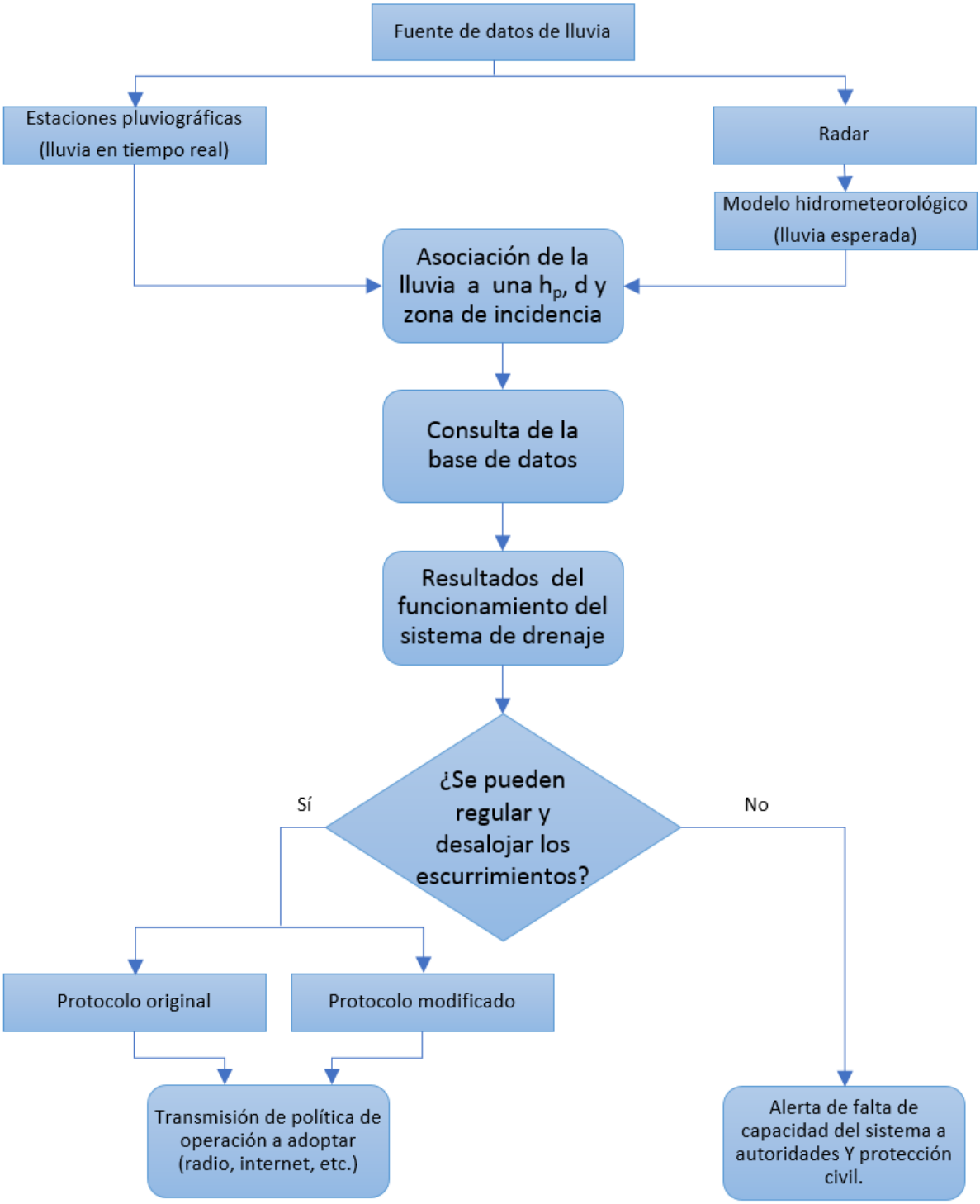


Figura 5.- Diagrama de flujo para emplear la base de datos de simulaciones (Etapa 2 del Modelo Conceptual).

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Dadas las características de la cuenca del Valle de México, la complejidad del sistema de drenaje, su magnitud, la falta de instrumentación y la limitante de recursos humanos y económicos, resulta prácticamente imposible lograr en un corto plazo manejar el sistema en tiempo real y operarlo de forma automática y remota, tal y como ya se hace en sistemas menos complejos de algunos países del primer mundo.

Por lo anterior, es necesario implementar en el corto plazo una solución que permita conocer la mejor política de operación antes de la ocurrencia de una lluvia, o bien, cuando ésta apenas

comienza; de manera que, mediante la operación eficiente de la infraestructura, se reduzca el peligro de fallas o desbordamientos en los elementos que conforman el sistema de drenaje.

Derivado de lo anterior, se plantea este Modelo Conceptual que integra los resultados de simulaciones hidráulicas, previamente ejecutadas para distintas lluvias teóricas e históricas; de modo que, ante la ocurrencia de un evento de lluvia, con sólo conocer la altura de precipitación *(hp)*, la duración de la tormenta *(d)* y la zona de incidencia de la lluvia, será posible conocer no sólo el funcionamiento hidráulico esperado del sistema de drenaje, sino también la política de operación más adecuada a ejecutar.

El alto rigor técnico, en el que se basa el Modelo Conceptual, dará seguridad a los tomadores de decisiones para operar el sistema de drenaje de la ZMVM, con mayor certidumbre, e inclusive, con anticipación ante la incidencia de cualquier lluvia que se presente en la ZMVM.

Específicamente, el Modelo Conceptual (una vez que se ingresen los datos de *hp, d* y zona de incidencia de la lluvia) logrará:

- Proporcionar datos específicos de la política de operación a ejecutar, de manera prácticamente instantánea, anticipándose a la lluvia real (mediante los parámetros de lluvias pronosticadas mediante un radar meteorológico).
- Proporcionar datos específicos para modificar la política de operación en curso, durante una tormenta real en proceso (a través los datos de lluvia obtenidos de los registros en tiempo real de las estaciones pluviográficas existentes).
- Emitir alertas para que las brigadas de emergencia de las instituciones correspondientes acudan a los sitios donde sea probable la falla de algún conducto o estructura (cuando el análisis de las simulaciones hidráulicas almacenadas en la base de datos detecte que la capacidad de conducción o desalojo de un conducto o estructura será rebasada ante determinada lluvia).

La creación de la base de datos que se plantea es de gran importancia; a través de ella, se contará con información teórica e histórica del funcionamiento hidráulico del sistema, condición que cubre, en un amplio porcentaje, la necesidad de simularlo en tiempo real.

Se concluye que, dada la complejidad del sistema de drenaje y los recursos técnicos y económicos requeridos para implementar una plataforma que funcione en tiempo real, automática y remota, el Modelo Conceptual propuesto resulta una alternativa viable, de bajo costo y fácil de operar. Esta solución proporcionaría la posibilidad de contar, en el corto plazo, con la base técnica que requiere la Comisión Metropolitana de Drenaje para operar, de manera eficiente y segura, el complejo sistema de drenaje de la ZMVM.

El Modelo Conceptual propuesto no elimina la necesidad de iniciar lo antes posible las acciones para la implementación del sistema operado en tiempo real. Se sugiere que éste sea utilizado únicamente durante el tiempo que tome poner en marcha ese avanzado sistema.

REFERENCIAS

Leal, G. (2017). *Modelo Conceptual para el pronóstico del funcionamiento hidráulico del sistema de drenaje de la ZMVM, ante tormentas de determinada magnitud.* Trabajo de Ingreso a la Academia de Ingeniería México A.C. México. (El presente artículo es un extracto de dicho documento).

IAHR **AIIH**

XXVIII CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA
BUENOS AIRES, ARGENTINA, SEPTIEMBRE DE 2018

¿QUÉ HACE QUE LOS SOCIO-ECOSISTEMAS SEAN SUSTENTABLES? ANÁLISIS DESDE UNA PERSPECTIVA INSTITUCIONAL

Verónica Farreras[†] y Laura Ortega[‡]

[†]IANIGLA (CCT-CONICET-Mza.) y Facultad de Ciencias Económicas de la Universidad Nacional de Cuyo
[‡]INCIHUSA (CCT-CONICET-Mza.) y Facultad de Ciencias Políticas de la Universidad Nacional de Cuyo
vfarreras@mendoza-conicet.gob.ar
lortega@mendoza-conicet.gob.ar

RESUMEN:

Este trabajo trata con la sustentabilidad del recurso hídrico a nivel socio-ecosistema. Se plantea un marco conceptual para analizar los arreglos institucionales que afectan las interacciones entre el recurso, sus usuarios, la infraestructura de riego y sus administradores. Se postula que el vínculo entre los usuarios del recurso y la infraestructura de riego es una interacción clave que puede afectar la sustentabilidad de los socio-ecosistemas. A través de un caso de estudio, se ilustran algunos problemas causados por el debilitamiento de este vínculo.

ABSTRACT:

This paper deals with the sustainability of water resources at the social-ecological system level. A conceptual framework is proposed to analyze the institutional arrangements affecting the interactions among the resource, its users, the irrigation infrastructure, and its managers. We postulate that the link between the resource users and the irrigation infrastructure is a key interaction that may affect the sustainability of the social-ecological system. By using a case study, we illustrate some of the problems caused by the weakening of this link.

PALABRAS CLAVES: recurso hídrico; sustentabilidad; arreglos institucionales

INTRODUCCIÓN

En la actualidad la mayoría de los expertos coinciden en que los procesos que ponen en riesgo la sustentabilidad del recurso hídrico se deben principalmente a una mala gestión del recurso (Aldaya *et al.*, 2010). Una respuesta típica ha sido mejorar la comprensión de los Socio-Ecosistemas (SE) y así reducir la incertidumbre que enfrentan los responsables de la toma de decisiones. Sin embargo, siempre existe un grado de incertidumbre irreductible en las dinámicas de los sistemas sociales y ecológicos. Este hecho sugiere que, en lugar de preguntarnos cómo se puede gestionar mejor nuestros recursos, deberíamos preguntarnos: ¿Qué hace que los SE sean sustentables?

Para responder a esta pregunta, restringimos nuestra atención a aquellos SE donde los individuos han invertido dinero, tiempo y esfuerzo en algún tipo de infraestructura física y/o institucional para gestionar sus recursos. La primera incluye cualquier obra de ingeniería en la red de riego como, por ejemplo, diques, canales, desagües. Mientras que por la última nos referimos a las reglas efectivamente utilizadas por quienes administran y/o usan el SE y, aquellos factores que reducen los costos de transacción asociados con la supervisión y cumplimiento de estas reglas (Ostrom y Ahn, 2003). A partir del marco conceptual diseñado por Ostrom (2007), se plantea un marco que incluye cuatro subsistemas básicos de primer nivel relevantes para el análisis de la sustentabilidad del recurso hídrico a nivel SE. Posteriormente, mediante el uso de este marco se discute, desde una perspectiva institucional, un caso de estudio que trata con un SE condicionado por un conjunto de reglas que no sólo impacta en las interacciones socioecológicas, sino que, además, afecta el desempeño socioeconómico y ecológico del SE.

En este trabajo se tematiza la idea de gobernanza como posible camino para el establecimiento de espacios de participación tendientes a favorecer rutinas y comportamientos colectivos; interacciones que construyen una relación directa entre usuarios y administradores de la infraestructura del recurso, posibilitando arreglos institucionales basados en la confianza, reciprocidad y cooperación; que definen la orientación y el carácter transformador de los usuarios y administradores sobre las capacidades y competencias del SE.

El sistema socio-ecológico de referencia es la Cuenca del río Mendoza prioritariamente dispuesto para el abastecimiento de agua tanto para uso rural, como urbano; localizado en la franja árida sudamericana en la zona de oasis cuyanos de la provincia de Mendoza (Argentina). Este sistema ha sido suficientemente indagado desde el campo académico y de gestión, concluyéndose que el mismo es altamente vulnerable por la presión que se ejerce sobre el recurso, característico de una zona árida desarrollada en base a la agricultura (Vich, 2016).

El trabajo se estructura de la siguiente manera: en la próxima sección se presenta el marco teórico metodológico. En la tercera sección se realiza una aplicación del marco conceptual propuesto, exponiendo los antecedentes históricos que sustentan el análisis del SE de interés; y finalmente, en la última sección se discuten las principales conclusiones.

MARCO TEÓRICO METODOLÓGICO

En la Figura 1 se presenta una visión general del marco propuesto, adaptado al SE de la Cuenca del río Mendoza. Este marco identifica un conjunto de interacciones que son de importancia clave para el análisis de complejos sistemas socio-ecológicos. En dicha figura se pueden observar las interacciones entre cuatro subsistemas básicos de primer nivel –Recurso [R], Infraestructura de Riego [IR], Administradores de la Infraestructura de Riego [AIR] y Usuarios del Recurso [UR]– que, retroalimentándose entre sí, interactúan además con el Contexto social, económico y político-institucional [C] y con los Ecosistemas Relacionados [ER].

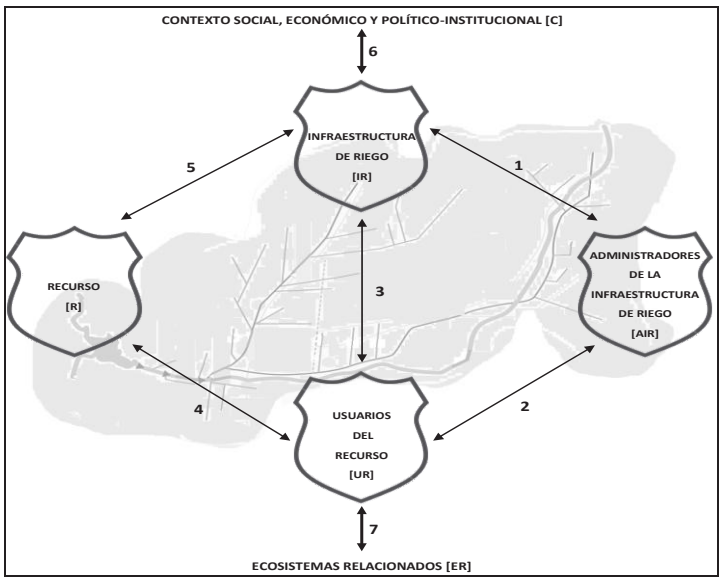


Figura 1.- Socio-ecosistema de la Cuenca del río Mendoza
Fuente: Adaptado de Ostrom (2007).

Cada subsistema central está compuesto de múltiples variables de segundo nivel que podrían, además, descompone en un tercer nivel y, así sucesivamente (Tabla 1). En general, la elección de las variables relevantes que conforman el segundo nivel o niveles más profundos depende de los objetivos de la investigación, del tipo de SE y de la escala de análisis espacial y temporal de interés (Ostrom, 2009). Las variables de la Tabla 1, han sido identificadas en la teoría e investigación empírica local (Morábito y Salatino, 2010; Saldi *et al.*, 2014; Bustos, 2014) e internacional (Araral, 2005; Garcés-Restrepo *et al.*, 2007; Meinzen-Dick, 2007; Ostrom, 2009) como factores clave que pueden afectar las siguientes interacciones socioecológicas (Figura 1):

- entre los administradores y la infraestructura que gestionan [1],
- entre los usuarios del recurso y los administradores de la infraestructura de riego [2],
- entre los usuarios del recurso y la infraestructura de riego [3],
- entre los usuarios del recurso y el aprovechamiento del recurso [4],
- entre la infraestructura de riego y el recurso [5],
- entre el SE y el contexto social, económico y político-institucional [6] y
- entre el SE y los ecosistemas relacionados [7].

Estas interacciones giran en torno a los vínculos sociales entre usuarios y administradores, las reglas diseñadas para restringir sus acciones y el proceso de elección colectiva utilizado para generar dichas reglas. Son particularmente importantes para determinar la probabilidad de que los usuarios pertenecientes a un sistema de gobernanza diseñado por un conjunto de reglas logren la sustentabilidad del SE.

Tabla 1.- Variables de segundo nivel e interacciones socioecológicas presentes en el SE de la Cuenca del río Mendoza

Contexto Social, Económico y Político-Institucional [C]
C 1– Desarrollo económico
C 2– Tendencias demográficas
C 3– Estabilidad política
C 4– Otros sistemas de gobernanza
C 5– Mercados
C 6– Obras públicas de infraestructura
C 7– Tecnología

Recurso [R]: R 1– Unidad de recurso: Agua de riego superficial R 2– Disponibilidad de agua por temporada R 3– Distribución espacial y temporal del agua R 4– Interacción hidrológica entre unidades de riego: R 4.1– Interacción dentro del sistema R 4.2– Interacción entre sistemas	**Administradores de la Infraestructura de Riego [AIR]:** AIR 1– Organizaciones que diseñan y aplican las reglas en uso: AIR 1.1– Departamento General de Irrigación AIR 1.2– Inspecciones de Cauce AIR 1.3– Empresas Públicas Nacionales AIR 1.4– Asociaciones de Inspecciones de Cauce AIR 2– Organizaciones que aplican procesos de monitoreo y sanción: AIR 2.1– Departamento General de Irrigación AIR 2.2– Inspecciones de Cauce AIR 2.3– Asociaciones de Inspecciones de Cauce
Infraestructura de Riego [IR]: IR 1– Infraestructura física: IR 1.1– Obras de ingeniería en la red primaria: IR 1.1.1– Diques IR 1.1.2– Canales matrices IR 1.1.3– Canales primarios IR 1.2– Obras de ingeniería en la red secundaria: IR 1.2.1– Canales secundarios IR 1.2.2– Hijuelas IR 1.2.3– Desagües IR 2– Infraestructura institucional: IR 2.1– Reglas en uso: IR 2.1.1– Reglas de elección colectiva IR 2.1.2– Reglas de elección operativas IR 2.1.3– Reglas de elección constitucionales IR 2.2– Procesos de monitoreo y sanción IR 2.3– Mecanismos de resolución de conflictos IR 2.4– Tipo de gobernanza: IR 2.4.1– Descentralización administrativa (policéntrica) IR 2.4.2– Centralización administrativa (monocéntrica) IR 2.5– Repertorio de normas y estrategias	**Usuarios del Recurso [UR]:** UR 1– Regantes UR 2– Hidroeléctricas UR 3– Usuarios de uso recreativo UR 4– Número de usuarios relevantes UR 5– Atributos socioeconómicos UR 6– Liderazgo/Emprendimiento UR 7– Historia o experiencias pasadas UR 8– Normas (confianza-reciprocidad) /Capital social UR 9– Conocimiento del SE UR 10– Dependencia del agua de riego superficial UR 11– Tecnología disponible
Ecosistemas Relacionados [ER] ER 1– Patrones climáticos ER 2– Patrones de contaminación ER 3– Servicios ecosistémicos	
Interacción [I]	
[1] Entre los administradores y la infraestructura que gestionan: 1.1 Actividades de inversión: 1.1.1 Red primaria 1.1.2 Red secundaria 1.2 Actividades de monitoreo: 1.2.1 Red primaria 1.2.2 Red secundaria 1.3 Actividades de autogestión	
[2] Entre los usuarios del recurso y los administradores de la infraestructura de riego: 2.1 Régimen de votación para elegir a los inspectores de cauce 2.2 Administración de los recursos financieros 2.3 Aporte monetario de los regantes para el funcionamiento operativo de la red de riego 2.4 Actividades de evaluación del desempeño de los administradores 2.5 Procesos deliberativos 2.6 Conflictos internos 2.6.1 Entre usuarios 2.6.2 Entre usuarios e inspectores de cauce	

2.6.3 Entre usuarios y el Departamento General de Irrigación
2.7 Intercambio de información:
2.7.1 Información sobre el uso del recurso
2.7.2 Información sobre las condiciones del recurso
[3] Entre los usuarios del recurso y la infraestructura de riego:
3.1 Participación en la coproducción de la infraestructura física e institucional
[4] Entre los usuarios del recurso y el aprovechamiento del recurso:
4.1 Eficiencia en el uso del agua
4.2 Equidad en la distribución del agua
4.3 Intensidad de cultivos
4.4 Rendimientos
[5] Entre la infraestructura de riego y el recurso:
5.1 Impacto de la infraestructura en la calidad y cantidad del agua suministrada para los diferentes usos
[6] Entre el SE y el contexto social, económico y político-institucional:
6.1 Procesos político-institucionales alternativos
6.2 Cambios en el contexto social y económico
[7] Entre el SE y los ecosistemas relacionados:
7.1 Externalidades ambientales
7.2 Flujos de entrada y salida a la Cuenca del río Mendoza

Fuente: En base a Ostrom (2007) y McGinnis y Ostrom. (2014).

Los académicos que estudian los sistemas socio-ecológicos han realizado considerables avances en la identificación de las interacciones socioecológicas que afectan la sustentabilidad. Sin embargo, debido a que muchos de los responsables de la toma de decisiones desestiman la participación de los usuarios en la coproducción de la infraestructura física e institucional, la interacción [3] ha recibido considerablemente poca atención en la mayoría de los análisis de SE (Evans, 1997). Nuestro objetivo es analizar, desde una perspectiva institucional, el papel que juegan las interacciones socioecológicas y, en particular, la forma en que éstas establecen mecanismos causales que vinculan un tipo particular de gobernanza con la sustentabilidad del sistema.

Como se verá en la próxima sección, el caso de estudio que trata con el SE de la Cuenca del río Mendoza ilustra cómo un cambio en el contexto político-institucional condujo al debilitamiento de la Interacción [3] afectando las Interacciones [1] y [2] y, por lo tanto, la sustentabilidad del sistema.

APLICACIÓN DEL MARCO CONCEPTUAL

En Mendoza, la administración de las cuencas está a cargo del Departamento General de Irrigación –en adelante DGI– y de las comunidades de usuarios denominadas Inspecciones de Cauce –en adelante IC. El DGI [AIR 1.1/AIR 2.1 – Tabla 1] como organismo estatal de aplicación de la Ley de Aguas se ocupa del recurso hídrico a nivel de ríos, diques [IR 1.1.1], canales matrices [IR 1.1.2] y primarios [IR 1.1.3]. En tanto que las IC [AIR 1.2/AIR 2.2], a través de los propios usuarios, administran la red secundaria de riego [IR 1.2]: canales [IR 1.2.1], hijuelas [IR 1.2.2] y desagües [IR 1.2.3]. De modo que, en materia de gestión del agua en Mendoza, existe una doble descentralización administrativa (Ruiz Freites, 2007).

Este sistema descentralizado, participativo con autogestión, plasmado en la organización administrativa consagrada en la Ley de Aguas de 1884 y ratificado por la Constitución provincial vigente, patrocina la facultad que tienen los usuarios de canales, hijuelas y desagües de elegir sus propias autoridades [2.1] y administrar sus recursos financieros [2.2].

En la Cuenca del río Mendoza, como en las demás cuencas de la Provincia, las IC mediante procesos de decisión colectiva [IR 2.1.1] generan un conjunto de reglas diseñadas para la distribución y uso del recurso, la operación diaria y mantenimiento de la infraestructura de riego [IR 2.1.2]. Cuentan, además, con la facultad de elaborar sus propios estatutos de organización y funcionamiento [IR 2.1.3] y de monitorear y sancionar a quienes no respeten las reglas [IR 2.2].

A continuación, dado que nuestro objetivo es analizar el papel de las interacciones socioecológicas en la sustentabilidad; se aborda una serie de antecedentes que podrían ayudar a identificar algunos de los mecanismos causales que han condicionado la gobernanza en el SE de interés.

Desde la sanción de la ley de aguas hasta 1940, se suscitaron reiterados conflictos entre usuarios e inspectores de cauce [2.6.2] motivados principalmente por el fraude que se realizaba regularmente en las votaciones para la elección de las autoridades de riego [2.1] (Ortega, 2016). El potencial de conflicto llegó a ser de tal envergadura que fue necesaria la intervención del DGI. Si bien, el DGI contaba con mecanismos de resolución de conflictos [IR 2.3] que le otorgaban legalidad para discutir y resolver aquello que constituía la fuente del conflicto, su intervención fue percibida por la mayoría de los usuarios como un deliberado artificio que quitaba autonomía a las IC al imponer autoridades que eran condescendientes con las políticas del Departamento (Ortega, 2009). De manera que, el proceso por medio del cual habían sido elegidas las nuevas autoridades carecía de legitimidad. Este hecho condujo a un resquebrajamiento de las normas de confianza y reciprocidad [UR 8] lo que no tardó en provocar una incapacidad del SE para adaptarse a los cambios que se venían produciendo en el contexto social, económico y político-institucional [C].

Así, a mediados de los años 50, impulsado por el desarrollo económico [C 1] y las inversiones en obras públicas de infraestructura [C 6], se produce el ingreso al SE de un nuevo usuario del recurso, que no sólo va a rivalizar en el consumo del agua de riego, sino que va a establecer un nuevo uso para el recurso, las hidroeléctricas [UR 2]; administradas por empresas públicas nacionales [AIR 1.3] con un dominio del recurso que trascendió el ámbito provincial hasta ese entonces vigente. Este nuevo usuario para poder operar va a requerir de una infraestructura física mucho más compleja que la disponible hasta ese momento [IR 1.1.1/IR 1.1.2]. Esto no sólo va a generar cambios en el SE de interés, sino que además afectará a los ecosistemas relacionados. Resulta interesante destacar que el ingreso de las hidroeléctricas no sólo se produjo en el SE de interés sino en otros SE relacionados [EC] como, por ejemplo, en la Cuenca del río Atuel y del Diamante.

El ingreso de un nuevo usuario perteneciente a un sistema de gobernanza diseñado por un conjunto de reglas diferente al que venía rigiendo el SE generó una reacción en el DGI que se reflejó en la introducción de modificaciones sustanciales que pervivirían hasta la década de los 90 (por ejemplo, la quita a las IC de la percepción del canon de riego [2.2] que a partir de entonces pasa a ser manejado por el DGI). Muchos especialistas en legislación de aguas hacen referencia a un cuadro de situación caracterizado por la proliferación de normas administrativas que condujeron a una mayor burocracia y centralización de la organización administrativa, en detrimento de la descentralización administrativa plasmada en la Ley de Aguas de 1884 (Marre, 2010). El paso de una gobernanza de descentralización administrativa (policéntrica) [IR 2.4.1] a una gobernanza de centralización administrativa (monocéntrica) [IR 2.4.2] en manos del DGI, propició la desjerarquización de las IC repercutiendo en el liderazgo y emprendimiento de los usuarios [UR 6], debilitando los procesos deliberativos [2.5] y, por ende, el capital social [UR 8].

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Los antecedentes mencionados en la sección anterior fueron desincentivando cada vez más la participación de los usuarios en la coproducción de la infraestructura física e institucional [3.1]. Bajo este contexto, el debilitamiento de la organización administrativa descentralizada y autárquica, factor sumado al bajo nivel de recaudación [2.3], intensificación de conflictos internos [2.6], perdida de información [2.7], deja relegadas las actividades de autogestión [1.3] desalentando las actividades de inversión [1.1] y monitoreo [1.2] y, por consiguiente, conduciendo a una pérdida de eficiencia [4.1] y equidad [4.2] en el aprovechamiento del recurso (Ruiz Freites, 2003). Dado que los sistemas social y ecológico establecen lazos de influencia recíproca, las interacciones entre los subsistemas ecológicos [5 y 7] también fueron debilitadas desafiando aún más la sustentabilidad del SE (Salomón, 2009).

A principios de los noventa, se impulsa el retorno a la génesis del modelo de organización administrativa consagrado en la Ley de Aguas de 1884. Con el regreso a la vieja ley se recupera la idea de una gobernanza del agua a través de las comunidades de usuarios autogestionadas. Bajo este contexto surge en 1993 la primera Asociación de Inspecciones de Cauce [AIR 1.4/AIR 2.3] de la Provincia, con la finalidad de coordinar y asistir a las IC en la administración del agua. De esta forma, las Asociaciones se sumaron a las instituciones existentes destinadas a la gobernanza del agua [AIR].

Con el retorno del modelo de descentralización administrativa, se restituye a las IC la administración de sus recursos financieros [2.2], transfiriéndoseles además asistencia técnica, conocimiento y capacitación [2.7], acompañando con ello un proceso de modernización al tiempo que se les devuelve la jerarquización perdida desde los años 50.

No obstante, a la historia o experiencias pasadas [UR 7], los espacios de participación tendientes a favorecer rutinas y comportamientos colectivos aún no han sido consolidados. Actualmente, la falta de participación de los usuarios en la coproducción como en los procesos deliberativos constituye uno de los principales desafíos a los que se enfrentan hoy todos los SE de riego de la Provincia. Por un lado, la baja participación pone en riesgo la interpretación colectiva del significado de las reglas. En este sentido, un SE puede volverse frágil desde adentro debido a conflictos internos generados por la mala interpretación de las reglas. Por otro lado, la baja participación origina procesos deliberativos carentes de legitimidad, lo que produce un resquebrajamiento del capital social atenuando la capacidad del SE para controlar, por ejemplo, el ingreso de nuevos usuarios al SE o, en el peor de los casos, el no evitar la salida de usuarios del sistema.

Desde hace unas décadas, en la Cuenca del río Mendoza se viene registrando un cambio en el uso de la tierra: la reconversión de fincas a complejos residenciales. Por un lado, este hecho produce el ingreso de nuevos usuarios que hacen un uso del recurso distinto del que se venía realizando hasta ese entonces. El paso de un uso productivo a uno recreativo [UR 3] no sólo está generando conflictos internos [2.6] sino que, además, la falta de reconocimiento por parte de estos nuevos usuarios de las reglas en uso del sistema [2.1] junto con la falta de disponibilidad de compartir normas y estrategias que forman parte de la tradición y la cultura del riego [IR 2.5] están poniendo en riesgo la sustentabilidad del sistema. Por otro lado, se origina la salida de usuarios para los cuales se diseñó el SE. En muchos casos, este egreso no es reemplazado por el ingreso de otros usuarios (renuncia al derecho de uso del agua), generando no sólo la pérdida de los aportes monetarios de los regantes para el funcionamiento operativo de la red de riego [2.3] sino que, además, provoca una desvinculación hidrológica entre unidades de riego [R 4] dificultando la distribución espacial del recurso [R 3], complicando las tareas operativas de mantenimiento de la red de riego [IR 2.1.2] y, por consiguiente, produciendo una pérdida de eficiencia [4.1] y equidad [4.2] en el aprovechamiento del agua de riego, afectando aún más la sustentabilidad del SE.

Así, procesos político-institucionales alternativos [6.1] y cambios en el contexto social y económico [6.2] ponen en riesgo la sustentabilidad del SE. Este hecho se debe principalmente a una falta de comprensión de cómo opera y de por qué es esencial el vínculo entre los usuarios del recurso y su infraestructura. Este caso ilustra el problema de no entender lo que hace que un SE sea sustentable y cómo este no entendimiento puede llevar a que procesos político-institucionales alternativos socaven hasta los SE más exitosos.

REFERENCIAS

Aldaya M.M, Martínez-Santos y P. Ramón Llamas, M. (2010) "Incorporating the Water Footprint and Virtual Water into Policy: Reflections from the Mancha Occidental Region, Spain". *Water Resour* Manage, Nº 24, pp. 941–958, USA.

Araral, E. (2005). "Bureaucratic incentives, path dependence, and foreign aid: An empirical institutional analysis of irrigation in the Philippines". *POLICY SCI*, Volume 38, September 2005, pp. 131–157.
Bustos, R. M. (2014). *Nacidos y criados, una especie en extinción: Identidad y disputas por el agua de riego de los pequeños productores en el oasis de Mendoza*, EDIUN, Mendoza, Argentina.
Evans, P. (1997). *State-Society Synergy: Government and Social Capital in Development*. GAIA, Research Series, UC Berkeley, USA.
Garcés-Restrepo, C., Vermillion, D. y Muñoz, G. (2007) *Irrigation Management Transfer*. Food and Agriculture Organization of the United Nations Rome, 2007.
Marre M. (2010). *El agua no es suficiente: Irrigación y administradores del agua. Una descentralización que retrocede*, EON ARGENTINA, Mendoza, Argentina.
McGinnis, M. D. y E. Ostrom. (2014). "Social-ecological system framework: initial changes and continuing challenges". *Ecology and Society,* Vol. 19(2): 30. http://dx.doi.org/10.5751/ES-06387-190230
Meinzen-Dick, R. (2007). "Beyond panaceas in water institutions". *Proc Natl Acad Sci*, 104, September 25, USA.
Morábito, J. A. y Salatino, **E.** (2010). "Hacia un aprovechamiento más eficiente del río Mendoza. Ambiente y ordenamiento territorial". PiPP. Mendoza, Argentina. http://www.politicaspublicas.uncu.edu.ar/articulo/hacia-un-aprovechamiento-mas-eficiente-del-rio-mendoza
Ortega, L. (2009) "Participación vecinal y asociaciones de la sociedad civil en el ámbito municipal de dos comunidades agrícolas en Mendoza en los comienzos del primer peronismo". *Revista Mundo Agrario*, Vol. 10(19).
Ortega, L. (2016) "Aspectos de la política hídrica en Mendoza durante el primer peronismo (1946-1952): el caso de los regantes de la cuenca inferior del río Tunuyán". *Boletín de Estudios Geográficos,* Nº. 106, enero – junio 2016, pp. 9-42.
Ostrom, E., y T. K. Ahn (editors) (2003). *Foundations of social capital.* Edward Elgar Publishers, Cheltenham, UK.
Ostrom, E. (2007). "A diagnostic approach for going beyond panaceas". *Proceedings of the National Academy of Sciences,* Nº 104, September 25 USA.
Ostrom, E. (2009). "A General Framework for Analyzing Sustainability of Social-Ecological Systems". *Science*, Vol. 325, pp. 419-422.
Ruiz Freites, S. J. (2003) "Proceso de descentralización en la administración del agua. Asociación de inspecciones de cauces cuenca del rio Mendoza (argentina)". Congreso Internacional del Agua, México, s/e. https://agua.org.mx/wp-content/uploads/2009/02/04_ruiz.pdf
Ruiz Freites, S. J. (2007). "Legislación y Administración de Aguas en Mendoza". MATHUS ESCORIHUELA, M. *Derecho y administración de aguas.* (Ed.), Zeta Editores, Mendoza, pp. 409-465.
Saldi, L., Sanchez, A. y Bustos, R. (2014). "Explotaciones familiares y procesos identitarios en el marco de la nueva ruralidad", *Nacidos y criados, una especie en extinción: Identidad y disputas por el agua de riego de los pequeños productores en el oasis de Mendoza.* Bustos, R. M. (comp.). EDIUN, Mendoza, Argentina.
Salomón, M. (2009). *La Gestión Hídrica desde las Propias Organizaciones de Usuarios. Asociación de Inspecciones de Cauce Primera Zona Río Mendoza (Argentina)*. http://www.asicprimerazona.com.ar/asic/publicaciones/Resumen_ponencia.pdf
Vich, A. (2016). *El balance hídrico como instrumento de gestión: oferta y demanda de agua en las cuencas de Mendoza*. Informe final. Proyecto Bienal 2013-2015 SECyT – UNCuyo (Res. No. 4540/No. 06/G708).

IAHR **AIIH**

XXVIII CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA
BUENOS AIRES, ARGENTINA, SEPTIEMBRE DE 2018

PROYECTO DE VIDEOS EDUCATIVOS DE LABORATORIO DE MECÁNICA DE FLUIDOS

Jorge Luis Zegarra Tarqui[1]; Gean Lopes Teixeira[2]; Edna Maria de Faria Viana[1]; Aloysio Portugal Maia Saliba[1]; Denise Maciel de Almeida Diniz[3], Carlos Barreira Martinez[4]

[1]Doctor(a), Profesor(a) del Departamento de Hidráulica y Recursos Hídricos, Centro de Pesquisas Hidráulicas e Recursos Hídricos - CPH, Sala G 406. Av. Antônio Carlos 6627, Campus da Universidade Federal de Minas Gerais, Bairro Pampulha, cidade de Belo Horizonte, Estado de Minas Gerais.
CEP: 31270-901. tel: (31) 3409-1078 - Fax: (31) 3409-4823. Brasil.
jlztarqui@yahoo.com.br; aloysiosaliba@gmail.com; ednamariafaria@bol.com.br
[2] Estudiante de Ingenieria Civil de La Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil.
geanteixeira1@eng-civ.grad.ufmg.br
[3]Mestre, Professora da Facultade IBMEC e Centro Universitário UMA, e-mail: denisemadiniz@gmail.com
[4] Universidade Federal de Itajubá, Instituto de Engenharia Mecânica. Rua Coronel Francisco Braz -112 Centro CEP 37500005 - Itajubá, MG – Brasil Telefone: (35) 36291639 Ramal: 1639,
martinez@cce.ufmg.br

RESUMEN:

Con la finalidad de modernizar la forma de ministrar la práctica experimental de la asignatura de Mecánica de Fluidos, de la carrera de Ingeniería Civil de la Universidad Federal de Minas Gerais, dentro del contexto de clase invertida, se optó por elaborar un material didáctico visual (vídeos). Debido al poco tiempo disponible dentro la carga horaria de la asignatura, fue designado que los propios estudiantes elaborarían estos vídeos. En total fueron 18 vídeos, desarrollados cada uno por un grupo de cuatro alumnos como máximo. Los videos fueron en su mayoría de buena calidad, dentro de las limitaciones de los recursos en las producciones, muchos grupos de alumnos usaron celulares para filmar y la edición de los videos lo hicieron empleando software de uso libre. Los videos están disponibles en el youtube y pueden ser vistos por alumnos de otras clases y de otras universidades.

ABSTRACT:

With the purpose of improving the experimental practice of the subject of Fluid Mechanics, of the Civil Engineering career of the Federal University of Minas Gerais, within the context of inverted class, it was decided to elaborate a visual didactic material (videos). Due to the short time available within the timetable of the subject, it was designated that the students themselves would elaborate these videos. In total there were 18 videos, developed each video by a group of four students maximum. The videos were mostly of good quality, within the limitations of the resources in the productions, many groups of students used cellphones to film and the editing of the videos did it using free software. The videos are available on YouTube and can be viewed by students from other classes and other universities.

PALABRAS CLAVES: mecánica de fluidos, enseñanza de laboratorio, clase invertida.

INTRODUCCIÓN

La educación tiene por finalidad que las bases de nuestra cultura permanezcan y ser mejoradas en cada generación, permitiendo la continuidad de nuestra sociedad. Antiguamente, las instituciones de enseñanza eran fuentes del conocimiento y de la información, con la llegada de los avanzos tecnológicos pasamos de una sociedad de industrialización para una sociedad del conocimiento, en esa mudanza el papel del profesor también mudo significativamente, pasando de un detentor del conocimiento para un gestor del conocimiento, visto que en la actualidad existen muchas fuentes de información de fácil acceso, retirando el papel del profesor desde el punto de vista de la transmisión del contenido del conocimiento en sala de clases. Esos cambios afectan también la enseñanza superior (técnica y universitaria), pero se observa que la práctica de enseñanza en la Universidad, específicamente en las carreras de Ingenierías, no tuvo grandes cambios de la forma que se enseñaba hace 20 años, esto se debe a que la mayoría de nuestros profesores fueron formados en el periodo pre sociedad del conocimiento, generando una inercia a cambios significativos del proceso de enseñanza, esto es antagónico frente al hecho que los actuales alumnos viven planamente la sociedad del conocimiento (Rejas, 2011).

En el Brasil, hubo un crecimiento muy acentuado de los cursos de ingeniería, específicamente en la oferta de las instituciones privadas, debido a la demanda del mercado (Salermo et all, 2012), muchas de esos cursos adoptan como metodología de enseñanza las clases prácticas, y dentro de ellas las clases de laboratorio, debido a exigencias de Ministerio De Educación que establece que un requisito abertura de una carrea esta debe contar con la infraestructura adecuada, esta misma exigencias son extensivas a las carreas de ingeniería ofertadas por las instituciones de Enseñanza Superior del Estado.

Dentro de la Ingeniería Civil tenemos el curso de Mecánica de Fluidos, dentro del plan de estudios, como una asignatura de formación básica y es pre requisito para asignaturas como Hidráulica de conductos cerrados y abiertos, así como otras como sistemas de abastecimiento de agua, obras hidráulicas, aprovechamientos hidráulicos, hidrología, etc. Entonces, existe la necesidad de evaluar la forma de enseñanza de las asignaturas de ingeniería, y en especial las clases prácticas, dentro de una perspectiva de mudanza del actual tipo de sociedad que vivimos y de sus demandas, desde el punto de vista de formación de los nuevos profesionales de Ingeniería.

Actualmente, existe una tendencia a mudar la forma de enseñanza, una de las propuestas es la clase invertida (*flipped classroom*), acuñado por Walvoord y Johnson Anderson (1998) consiste que los estudiantes absorben primero de forma independiente el contenido o conocimiento, de esta forma en la clase se procura la comprensión más profunda del conocimiento mediante un aprendizaje activo (sintetizar e resolver problemas). En este nuevo método de enseñanza la práctica experimental toma una fuerte importancia. Observase que en la elaboración de la práctica de laboratorio convencional se pierde mucho tiempo con la explicación del procedimiento experimental, restando poco tiempo para la colecta y análisis de datos y resultados. Entonces, surgió la necesidad de elaborar un material audiovisual (vídeos) que permita preparar el estudiante antes de la práctica experimental. O presente artículo pretende mostrar el resultado obtenido y discutir los alcances futuros para la mejora de la enseñanza.

METODOLOGIA

Con la finalidad de modernizar la forma de ministrar la práctica experimental, dentro del contexto de clase invertida, se optó por elaborar material didáctico visual (vídeos). Debido al poco tiempo disponible dentro la carga horaria de la asignatura, fue definido que los propios alumnos elaborarían estos vídeos.

Los vídeos fueron producidos por los alumnos de la asignatura de Mecánica de Fluidos C, de la carrera de Ingeniería Civil de la Universidad Federal de Minas Gerais, en total fueron casi 70 alumnos del semestre 2017-2 dividido en las clases B y C.

O procedimiento metodológico fue el siguiente:

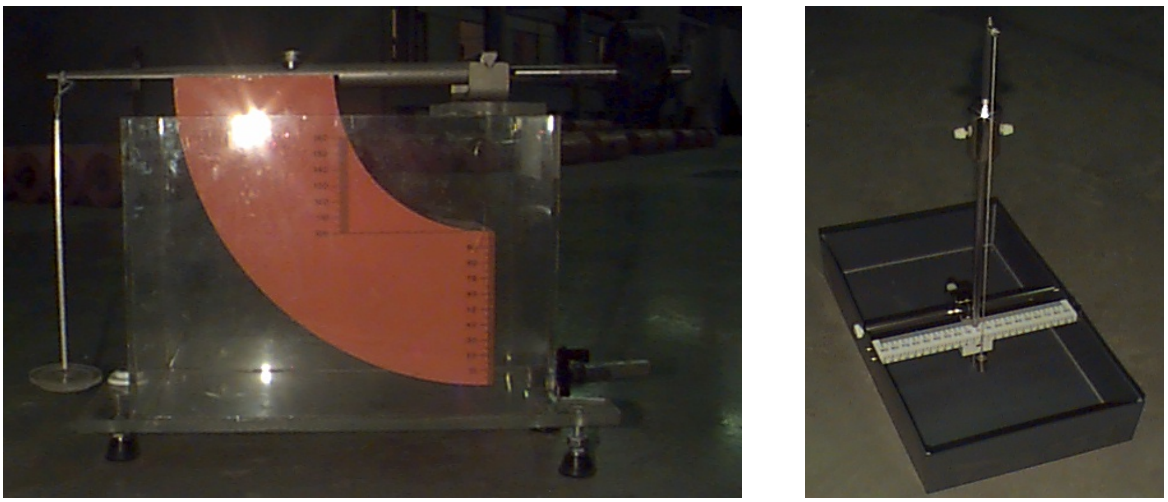
- Fueron definidos las prácticas experimentales a ser trabajadas por los grupos de alumnos (compuesto de 4 alumnos máximo)

- Fueron entregues el manual del procedimiento experimental de cada práctica para cada grupo (Matinez *et all*, 2015).

- Os grupos fueron trenados en el uso del equipamiento. En general demoró treinta minutos para entrenar los alumnos en el uso de los equipamientos, para eso se definieron horarios alternativos para atender todos los grupos.

- Fue reservado un momento para discutir con los grupos el guión y nociones de técnicas de filmación.

A continuación las imágenes de los equipamientos utilizados para la producción de los videos.



(a) (b)

Figura 1. (a) equipamiento de medición de fuerza hidrostática en superficie plana; (b) equipamiento para determinación de empuje y estabilidad.

Los equipamientos para la determinación de la fuerza hidrostática sobre superficie plana y para el estudio de empuje y estabilidad pertenecen a la Armfields. Estos experimentos pertenecen a los asuntos que envuelven estática de fluidos.

En la figura 2, se presenta el equipamiento para el estudio de del régimen del escurrimiento, dicho fue construidos por los profesores de la Universidad Federal de Minas Gerais y son empleados en las clases introductorias de dinámica de fluidos. En dicho equipamiento puede ser visualizado las mudanzas del pasaje de un régimen laminar para turbulento.

Figura 2. Experimento de Reynolds construido en la Universidad Federal de Minas Gerais, para visualizar régimen de escurrimiento.

En la figura 3, se presenta un equipamiento también construido en la Universidad Federal de Minas Gerais, y se emplea para determinar experimentalmente las pérdidas de carga del tipo distribuida y localizada. Para el ensayo de pérdida de carga distribuida es posible determinar el valor del factor de atrito *f* para un tubo de PVC de un metro de largura.

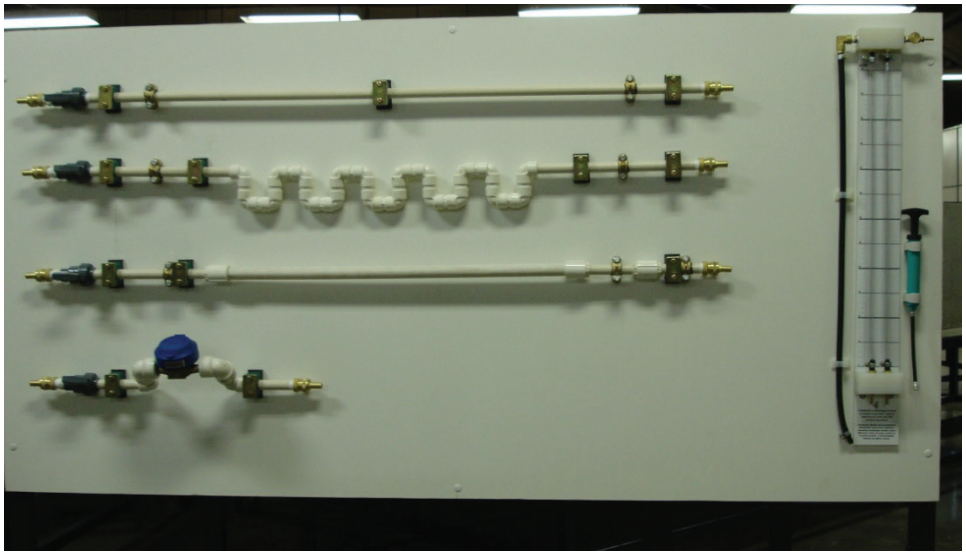


Figura 3.- Equipamiento construido en la Universidad Federal de Minas Gerais, para estudio de las pérdidas de carga distribuidas y localizadas.

Para el caso de la pérdida de carga localizada es posible determinar el valor de L_e largura equivalente.

RESULTADOS

Fueron en total de 18 vídeos. A pesar que a todos os vídeos fueron hechos de forma aficionada, pudo se observar disparidad en la producción de los mismos, pues algunos grupos hicieron trabajos más elaborados que otros, explorando mejor los recursos de edición y trabajando mejor el guión de la presentación.

Los vídeos están siendo usados en las clases de los semestres posteriores, para eso se pide a los alumnos para que vean los vídeos antes de las clases prácticas. Fue observado que es posible obtener clases más dinámicas, no perdiendo tiempo con la explicación del funcionamiento de los equipamientos. De esta forma es posible discutir mejor los resultados.

A continuación presentamos 15 ejemplos de videos que fueron publicados en el youtube.com:

Asunto	**Link**
Fuerza hidrostática sobre superficie plana sumergida	https://youtu.be/Geuyu6HwWWg https://www.youtube.com/watch?v=4tQBU_wI378
Empujo e estabilidad	https://www.youtube.com/watch?v=R5M9MRVEOrM
Empujo	https://www.youtube.com/watch?v=b3kALZb0TYw
Régimen de escurrimiento (Reynolds)	https://youtu.be/dJ2MXq5bgLU
Medición de caudal (Vertedores triangulares e	https://www.youtube.com/watch?v=2451mFYyzxE https://www.youtube.com/watch?v=_QrrmaesclI https://www.youtube.com/watch?v=olqReJ1Y7AE

rectangulares)	https://www.youtube.com/watch?v=ZVLpkxrNK7Q
Medición de caudal (placa de orificio)	https://www.youtube.com/watch?v=mkQkzvTEFvk https://www.youtube.com/watch?v=xR1zwuD_Ngk
Cantidad de movimiento linear (impacto de chorro en placa)	https://www.youtube.com/watch?v=6CP7Jxi9Mwo&feature=youtu.be https://www.youtube.com/watch?v=OoFzXKxDhEs
Pérdida de carga distribuida	https://www.youtube.com/watch?v=F9d3CrZjQlo https://www.youtube.com/watch?v=I1qgKxn-ASU

Con estos resultados positivos, se pretende futuramente la producción de vídeos explicando la teoría y la resolución de ejercicios. Otro aspecto que puede ser modificado es el formato del salón de clases, una técnica es la utilización de mesas y no de pupitres, esto permite la mejor interacción entre los alumnos luego de realizar los experimentos.

CONCLUSIONES

Los videos fueron en su mayoría de buena calidad, dentro de las limitaciones de los recursos en las producciones, muchos grupos de alumnos usaron celulares para filmar y la edición de los videos lo hicieron empleando software de uso libre. Los videos están disponibles en el youtube y pueden ser vistos por alumnos de otras clases y de otras universidades. Actualmente el material producido será empleado por los alumnos del semestre posteriores, futuramente en el final de la asignatura será realizada una encuesta de la utilidad del video en la práctica de laboratorio.

Posteriormente serán producidos otros videos con otros bancos de teste y será iniciada la producción de vídeos de resolución de problema propuestos en la asignatura.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Martinez, C. B.; Viana, E. M. de F.; e Tarqui, J. L. Z. (2015) *"Manual de Laboratório de Mecânica de Fluidos C"* CPH/EHR: Belo Horizonte, 57p

Salerno, M. S.; Toledo, D. G. C. de; Gomes, L. A. V.; y Lins, L. M. (2012)*"Tendências e Perspectivas da Engenharia no Brasil"*. Instituto de Estudos Avançados da Universidade de São Paulo, Relatório EngenhariaData2012, 52p.

Rejas, L. P. (2011). "Desafíos para el profesorado en la sociedad del conocimiento". *Ingeniare: Revista chilena de Ingeniería*, Universidad de Tarapaca, Vol. 20, No. 1, 2012, pp. 136-144.

Walvoord, B. E, and Anderson, V. J. (1998). *Effective grading: A tool for learning and assessment*. San Francisco: JosseyJBass.

IAHR AIIH
XXVIII CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA
BUENOS AIRES, ARGENTINA, SEPTIEMBRE DE 2018

REVISIÓN DE METODOLOGÍAS PARA EL APROVECHAMIENTO DEL AGUA EN ZONAS URBANAS Y RURALES

[1,2]*Luisa Martínez Acosta,* [2,3]*Alvaro López-Lambraño,* [1]*Alvaro López-Ramos*

[1] *Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Pontificia Bolivariana, campus Montería, Colombia;*
[2] *Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Diseño, Universidad Autónoma de Baja California, unidad Ensenada, B.C., México*
[3]*HIDRUS S.A. de C.V. Querétaro, México*
alopezl@hotmail.com, ingluisamartinez@gmail.com, altoti@gmail.com

RESUMEN:

La captación del agua lluvia ha cobrado interés en la actualidad como fuente de abastecimiento, debido a la distribución inequitativa de la precipitación, por lo tanto, el estudio de las metodologías para su aprovechamiento en zonas rurales y urbanas se ha convertido en un desafío. El presente documento relaciona diversas metodologías aplicadas en ambas zonas, buscando identificar los parámetros básicos requeridos para su análisis y las ventajas y desventajas de cada una.

ABSTRACT:

The rainwater harvesting has now gained interest as a source of supply, due to unequal distribution of precipitation, therefore, the study of methodologies for its use in rural and urban areas has become a challenge. This document relates different methodologies applied in both areas, seeking to identify the basic parameters required for their analysis and the advantages and disadvantages of each.

PALABRAS CLAVES: *aprovechamiento de agua lluvia, precipitación, escorrentía, área de drenaje*

INTRODUCCIÓN

La preocupación por la disponibilidad del agua, debido al aumento de la demanda por parte de la población se ha acentuado con la presencia del cambio climático. Es por esto que hoy día en ciudades importantes se habla de problemas de suministro del agua como es el caso de Ciudad del Cabo, donde se está acercando el día cero, en el cual el abastecimiento del agua se verá comprometido y estará regulada la cantidad que cada persona puede gastar (Olivier, 2018).

Lo anterior ocurre en zonas urbanas y rurales de climas áridos, semi áridos, tropicales, mediterráneos, llevando a los entes gubernamentales e investigadores a pensar en soluciones usadas ancestralmente, en las cuales la recolección del agua lluvia para usos agropecuarios y domésticos preponderaba (de Winnaar, Jewitt, & Horan, 2007; Domènech & Saurí, 2011). Estas soluciones se contemplan desde diversas perspectivas, teniendo en cuenta el uso que se le vaya a dar al recurso y la zona climatológica en la cual se encuentre localizada el área de estudio. Por lo tanto, el objetivo del presente artículo es desarrollar una revisión bibliográfica que permita establecer las metodologías y los tipos de recolección de agua lluvia utilizados teniendo en cuenta las zonas climatológicas y los usos a los cuales se destinará el recurso hídrico.

METODOLOGÍA

Las metodologías utilizadas en el aprovechamiento de aguas lluvias tienen una base fundamental y es el balance hídrico con el cual se determina la cantidad de agua disponible y requerida para satisfacer una necesidad determinada. Dichos balances se realizan a nivel de cuenca hidrográfica para calcular la cantidad de almacenamiento requerido, teniendo en cuenta los usos a los que se va a destinar el recurso hídrico. El modelo general de la ecuación de balance hídrico se muestra en la ecuación [1].

$$P \pm E \pm R \pm {}^{I}/_{D} \pm \Delta S = 0 \qquad [1]$$

Donde P es la precipitación, E evaporación, R escorrentía, ${}^{I}/_{D}$ infiltración o drenaje profundo y ΔS almacenamiento.

De la ecuación [1] se deduce que la entrada principal es la precipitación, dándole importancia a la cantidad y distribución. Es importante que los datos de las series de tiempo de esta variable sean obtenidos de las entidades encargadas de administrar las estaciones meteorológicas para garantizar su confiabilidad.

Para obtener la escorrentía R se debe calcular el coeficiente de escorrentía, el cual va a depender del tipo de suelo, vegetación, uso del suelo y pendiente, en el caso del análisis en zonas rurales y el tipo de techo utilizado cuando se trata de recolección de agua en zonas urbanas (Mwenge Kahinda, Taigbenu, & Boroto, 2010). El análisis del uso del suelo se puede realizar mediante imágenes satelitales, mapas de zonificación locales y fotografías aéreas (Mekonnen & Melesse, 2016; Mwenge Kahinda, Lillie, Taigbenu, Taute, & Boroto, 2008).

Cuando se busca definir un sistema de recolección de agua lluvia en zonas rurales y urbanas, se usan los sistemas de información geográfica (SIG), con los cuales se establecen las áreas idóneas para ubicar los sitios óptimos donde se pueden construir la infraestructura hidráulica para el almacenamiento del agua como lo son represas, micro presas, entre otros. La importancia de usar SIG consiste en que es una herramienta que permite evaluar las condiciones topográficas y características del suelo para determinar la capacidad de escorrentía en una cuenca (Bulcock & Jewitt, 2013; de Winnaar et al., 2007).

Una vez localizadas las zonas idóneas para almacenamiento, otro aspecto a tener en cuenta son los costos asociados a la construcción de la infraestructura, convirtiéndose en una preocupación la obtención de recursos económicos. En algunos países de África existen modelos gubernamentales que involucran subsidios para la adopción de sistemas de recolección de agua lluvia (Appan, 2000; Domènech & Saurí, 2011; Karpouzoglou & Barron, 2014). Igualmente, al iniciar un proceso de adopción de aprovechamiento de agua lluvia es importante involucrar a las comunidades afectadas para evitar el fracaso de este tipo de proyectos (Grum et al., 2016).

RESULTADOS Y DISCUSIONES

Las metodologías utilizadas normalmente en los sistemas de recolección de agua lluvia, se basan en los SIG con diferentes enfoques teniendo en cuenta la información requerida en la búsqueda de determinar el tipo de aprovechamiento de agua lluvia a utilizar o el lugar más idóneo para ubicar las estructuras de recolección (Adham, Wesseling, Riksen, Ouessar, & Ritsema, 2016; de Winnaar et al., 2007; Sayl, Muhammad, Yaseen, & El-shafie, 2016).

En la tabla 1 se indican las metodologías con los parámetros requeridos para desarrollar la misma. Es importante aclarar que en la tabla 1 sólo se muestran 5 de las 35 metodologías que se han analizado para los casos de la zona rural, donde además de los parámetros mencionados, existen otras consideraciones como el área de la cuenca y a las características del clima (velocidad y dirección del viento, entre otras).

Tabla 1.- Parámetros necesarios para la aplicación de las metodologías en zonas rurales

Metodología	Pendiente	Caract. clima		Red de Drenaje	Escorrentía	Suelo				Socio-económico		Distancia a		Tipo de estructura hidráulica
		Precipitación	Evaporación			Uso	Textura	Cobertura	Profundidad	Consulta a partes interesadas	Costo	Viviendas	Cultivos	
Enfoque de apoyo a la decisión para seleccionar e implementar técnicas de recolección de agua (árido y semiárido) (Grum et al., 2016)	X	X		X		X	X	X	X	X				X
Enfoque basado en Sistemas de Información Geográfica (SIG) para identificar sitios de escorrentía (semiárido) (de Winnaar, Jewitt, & Horan, 2007)	X	X				X	X	X				X	X	X
Metodología para evaluar las técnicas de recolección de agua lluvia (semiárido) (Adham, Riksen, Ouessar, & Ritsema, 2016).	X	X					X		X		X	X		X
Modelo para la evaluación y optimización de sistemas de recolección de agua lluvia (árido y semiárido) (Adham, Wesseling, Riksen, Ouessar, & Ritsema, 2016)	X	X			X									X
Delimitación de sitios potenciales para recarga de aguas subterráneas (árido y semiárido) (Mahmoud, 2014)	X	X	X		X	X	X	X						

De la tabla 1, se puede concluir que la pendiente y la precipitación son parámetros recurrentes en proyectos de recolección de agua lluvia en zonas rurales, en cualquier zona climática. Otro aspecto importante es el suelo (textura, uso, cobertura y profundidad) porque éste permitirá establecer la respuesta hidrológica de la cuenca ante precipitaciones con cierta probabilidad de ocurrencia.

De igual manera, en la tabla 2, se observan los parámetros para las metodologías aplicadas a zonas urbanas, donde los más importantes son la precipitación y la capacidad de almacenamiento. En este caso, el área de cuenca a contemplar es la superficie de los techos de las viviendas o edificaciones, por lo que para el coeficiente de escorrentía se analizan los materiales de estos y las características del suelo ya no toman relevancia.

Tabla 2.- Parámetros necesarios para la aplicación de las metodologías en zonas urbanas

Metodología	Caract. clima		Escorrentía	Área de recolección de agua (techos)	Demanda de agua diaria	Capacidad de almacenamiento
	Precipitación	Evaporación				
Sistema dual para aprovechar el agua del techo para usos no potables (Appan, 2000)	X	X				X
Evaluación del rendimiento global de la recolección de agua lluvia (RAL) bajo el cambio climático (Musayev, Burgess, & Mellor, 2018)				X	X	
Un enfoque probabilístico para el diseño y evaluación de sistemas de captación de agua de lluvia (subtropical sin estación seca) (Su, Lin, Chang, Kang, & Lin, 2009)	X				X	X
Tamaño óptimo de los tanques de recolección de agua de lluvia (TRAL) para uso doméstico (Londra, Theocharis, Baltas, & Tsihrintzis, 2015)	X		X	X	X	X
Impactos de los sistemas de recolección de agua de lluvia domésticos y agrícolas en la hidrología de cuencas (Ghimire & Johnston, 2013)	X			X	X	X

En la tabla 3 se consigna la información de las ventajas y desventajas de cada una de las metodologías para las zonas rurales, donde se evidencia que el uso de los sensores remotos y los SIG son herramientas importantes en la selección de los sitios más adecuados para ubicar las estructuras hidráulicas y que el aprovechamiento del agua lluvia sea eficiente.

De igual manera, en la tabla 3 dentro de las desventajas destacan los inconvenientes al involucrar a las partes interesadas, es decir, los expertos en el tema, los usuarios del recurso hídrico, la administración pública, entre otros. Por otro lado, cuando se ponderan o se dan pesos a los parámetros requeridos en algunas de las metodologías, se presentan problemas de subjetividad que pueden conllevar a selección de sitios de captación de agua lluvia poco adecuados, si no se tiene el suficiente cuidado.

Tabla 3.- Ventajas y desventajas de las metodologías aplicadas a zonas rurales

Metodología	Ventajas	Desventajas
Enfoque de apoyo a la decisión para seleccionar e implementar técnicas de recolección de agua (árido y semiárido) (Grum et al., 2016)	Se usa una puntuación de idoneidad basada en atributos de mapas temáticos elaborados en un SIG y se superpone con las cosechas de agua propuestas para luego hacer una evaluación multicriterio. La selección final se realiza con las partes interesadas (Grum et al., 2016)	Cuando se reúnen las partes interesadas, la elección de las herramientas de análisis para la situación que se presenta en cuanto a la selección de tipo de aprovechamiento de agua lluvia adecuado se convierte en un desafío y no debe ser compleja en tiempo, costos y cantidad de datos necesarios (Schwilch, Bachmann, & de Graaff, 2012).
Enfoque basado en Sistemas de Información Geográfica (SIG) para identificar sitios de escorrentía (semiárido) (de Winnaar et al., 2007)	Mediante el uso de esta metodología se reducen las áreas de la cuenca a zonas específicas donde se pueden ubicar las estructuras para la recolección de agua lluvia (de Winnaar et al., 2007).	Para pequeños embalses que se usen para almacenar la escorrentía y por lo tanto huertos a pequeña escala, por lo cual es poco probable su uso para áreas grandes de recolección de escorrentía (de Winnaar et al., 2007).
Metodología para evaluar las técnicas de recolección de agua lluvia (semiárido) (Adham, Riksen, et al., 2016)	Es una metodología aplicable a sistemas de recolección de agua lluvia existentes o a construir. En los existentes proporciona información adecuada de la eficiencia de las estructuras de recolección y en los proyectados, localiza el sitio más adecuado para su construcción.	Debido a que se deben hacer reuniones con partes interesadas, tiene el mismo inconveniente de la metodología presentada por Grum et al (2016).
Modelo para la evaluación y optimización de sistemas de recolección de agua lluvia (árido y semiárido) (Adham, Wesseling, et al., 2016)	El modelo puede ser usado en regiones con datos escasos, donde se recomiendan modelos con pocos parámetros.	A pesar de sus ventajas y su aplicabilidad, el modelo debe ser calibrado y aprobado para su uso en otras zonas.
Delimitación de sitios potenciales para recarga de aguas subterráneas (árido y semiárido) (Mahmoud, 2014)	Se demuestra que la detención remota, los SIG y el proceso de jerarquía analítica (PJA) son poderosas herramientas para ubicar zonas potenciales que se puedan usar para recarga de agua subterránea (Chowdhury, Jha, Chowdary, & Mal, 2008).	En la metodología, al asignar el peso para cada uno de los criterios, teniendo en cuenta la escala de calificación, se puede incurrir en subjetividades.

En el caso de las ventajas y desventajas de las metodologías aplicadas a zonas urbanas, éstas se presentan en la tabla 4. En dicha tabla se observa que dentro de las desventajas se encuentra la problemática relacionada con el coeficiente de escorrentía, ya que en los casos presentados se asume un valor fijo sin tener en cuenta los diferentes materiales de construcción de los techos, teniendo en cuenta que éste influye en las condiciones del escurrimiento en el área de captación (techos de viviendas o edificaciones).

Tabla 4.- Ventajas y desventajas de las metodologías aplicadas a zonas urbanas

Metodología	Ventajas	Desventajas
Sistema dual para aprovechar el agua del techo para usos no potables (Appan, 2000)	Se hace un análisis de la calidad el agua y se busca el tamaño óptimo de tanque de almacenamiento para suplir las necesidades de agua no potable y así disminuir los costos.	Aplicado a sistemas que poseen estructuras hidráulicas y en instituciones que tienen la capacidad para su aplicación
Evaluación del rendimiento global de la recolección de agua lluvia bajo el cambio climático (Musayev et al., 2018)	El estudio se realiza para diferentes países en el mundo, y se establecen tamaños de tanque para el abastecimiento de los usuarios en un 80% del tiempo en zonas áridas, teniendo en cuenta el tamaño de techo y tanque adecuado	Se toma un coeficiente de escorrentía fijo, sin tener en cuenta los diferentes materiales construcción de los techos de las viviendas en las diversas partes del mundo donde fue aplicado.
Un enfoque probabilístico para el diseño y evaluación de sistemas de captación de agua de lluvia (subtropical sin estación seca) (Su et al., 2009)	Involucrando la probabilidad de ocurrencia de la lluvia para el diseño del sistema se mejora la efectividad de la capacidad de almacenamiento para estructuras de RAL y así aliviar la presión en el suministro de agua.	Se requiere de un registro histórico amplio, preferiblemente superior a los 50 años, para que las probabilidades calculadas sean confiables.
Tamaño óptimo de los tanques de recolección de agua de lluvia (TRAL) para uso doméstico (Londra et al., 2015)	Cálculo de tamaños áreas de techos y volumen de tanque de almacenamiento para épocas secas y lluviosas que permiten abastecer a una vivienda durante 50% del año.	Se toma un coeficiente de escorrentía fijo, sin tener en cuenta los diferentes materiales construcción de los techos de las viviendas.
Impactos de los sistemas de recolección de agua de lluvia domésticos y agrícolas en la hidrología de cuencas (Ghimire & Johnston, 2013)	Se desarrolla el balance hídrico combinando la recolección de agua lluvia en zona urbana y rural,	Es necesaria ampliar la investigación en cuanto a la aceptación de las personas en el uso de este tipo de soluciones de abastecimiento de agua.

Una vez analizada la información inicial requerida para un proyecto de recolección en zonas urbanas y rurales, se establece que ambas necesitan la información histórica de los datos de precipitación, así como el coeficiente de escorrentía para realizar los cálculos de agua disponible en el área estudiada.

Conociendo la información existente en una zona y las características del clima, se pueden establecer los tipos de aprovechamiento del agua y la respectiva selección de las áreas idóneas para la ubicar dichas estructuras hidrológicas.

Finalmente, para el caso de las zonas rurales, la metodología con la cual se pueden obtener unos resultados va a depender de la cantidad de información disponible en la zona de estudio, sin embargo, esencialmente debe contemplarse la pendiente, la precipitación y los suelos. También debe involucrar los SIG y los sensores remotos dentro del proceso. Por otro lado, en el caso de las zonas urbanas, se deben conocer los datos de precipitación, el área de captación, así como la demanda necesaria, para obtener datos confiables.

CONCLUSIONES

Con las posibles consecuencias que el cambio climático generará en un futuro y que actualmente ya se están evidenciando, se hace necesario e importante definir un sistema de recolección de aguas lluvias que mitiguen la escasez o abundancia del recurso, dependiendo de la zona de estudio y del uso que se le piensa dar al recurso hídrico.

REFERENCIAS

Adham, A., Riksen, M., Ouessar, M., and Ritsema, C. J. (2016). "A methodology to assess and evaluate rainwater harvesting techniques in (semi-) arid regions". *Water (Switzerland)*, No 8, 1–23. https://doi.org/10.3390/w8050198

Adham, A., Wesseling, J. G., Riksen, M., Ouessar, M., and Ritsema, C. J. (2016). "A water harvesting

model for optimizing rainwater harvesting in the wadi Oum Zessar watershed, Tunisia". *Agricultural Water Management*, No. 176, June 2016, pp. 191–202. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.06.003

Appan, A. (2000). "A dual-mode system for harnessing roofwater for non-potable uses". *Urban Water*, No. 1, June 2000, pp. 317–321. https://doi.org/10.1016/S1462-0758(00)00025-X

Bulcock, L. M., and Jewitt, G. P. W. (2013). "Key physical characteristics used to assess water harvesting suitability". *Physics and Chemistry of the Earth*, No. 66, September 2013, pp. 89–100. https://doi.org/10.1016/j.pce.2013.09.005

Chowdhury, A., Jha, M. K., Chowdary, V. M., and Mal, B. C. (2008). "Integrated remote sensing and GIS-based approach for assessing groundwater potential in West Medinipur district, West Bengal, India". *International Journal of Remote Sensing*, No 30, 231–250. https://doi.org/10.1080/01431160802270131

de Winnaar, G., Jewitt, G. P. W., and Horan, M. (2007). "A GIS-based approach for identifying potential runoff harvesting sites in the Thukela River basin, South Africa". *Physics and Chemistry of the Earth*, No. 32 August 2007, pp. 1058–1067. https://doi.org/10.1016/j.pce.2007.07.009

Domènech, L., and Saurí, D. (2011). "A comparative appraisal of the use of rainwater harvesting in single and multi-family buildings of the Metropolitan Area of Barcelona (Spain): Social experience, drinking water savings and economic costs". *Journal of Cleaner Production*, No. 19, November 2010, pp. 598–608. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.11.010

Ghimire, S. R., and Johnston, J. M. (2013). "Impacts of domestic and agricultural rainwater harvesting systems on watershed hydrology: A case study in the Albemarle-Pamlico river basins (USA)". *Ecohydrology and Hydrobiology*, Vol. 13 No 2, 159–171. https://doi.org/10.1016/j.ecohyd.2013.03.007

Grum, B., Hessel, R., Kessler, A., Woldearegay, K., Yazew, E., Ritsema, C., and Geissen, V. (2016). "A decision support approach for the selection and implementation of water harvesting techniques in arid and semi-arid regions". *Agricultural Water Management*, No. 173, Mayo, 2016, pp. 35–47. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.04.018

Karpouzoglou, T. and Barron, J. (2014). "A global and regional perspective of rainwater harvesting in sub-Saharan Africa's rainfed farming systems". *Physics and Chemistry of the Earth*, 72, 43–53. https://doi.org/10.1016/j.pce.2014.09.009

Londra, P. A., Theocharis, A. T., Baltas, E., and Tsihrintzis, V. (2015). "Optimal Sizing of Rainwater Harvesting Tanks for Domestic Use in Greece". *Water Resources Management*, No 29, 4357–4377. https://doi.org/10.1007/s11269-015-1064-1

Mahmoud, S. H. (2014). "Delineation of potential sites for groundwater recharge using a GIS-based decision support system". *Environmental Earth Sciences*, No 72, 3429–3442. https://doi.org/10.1007/s12665-014-3249-y

Mekonnen, M. and Melesse, A. M. (2016). "Spatial runoff estimation and mapping of potential water harvesting sites: A GIS and remote sensing perspective, Northwest Ethiopia". *In Landscape Dynamics, Soils and Hydrological Processes in Varied Climates* (pp. 565–584). Switzerland: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-18787-7

Musayev, S., Burgess, E., and Mellor, J. (2018). "A global performance assessment of rainwater harvesting under climate change". *Resources, Conservation and Recycling*, No 132, 62–70. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.01.023

Mwenge Kahinda, J. marc, Lillie, E. S. B., Taigbenu, A. E., Taute, M. and Boroto, R. J. (2008). "Developing suitability maps for rainwater harvesting in South Africa. Physics and Chemistry of the Earth, 33(8–13), 788–799. https://doi.org/10.1016/j.pce.2008.06.047

Mwenge Kahinda, J., Taigbenu, A. E., & Boroto, R. J. (2010). "Domestic rainwater harvesting as an adaptation measure to climate change in South Africa". *Physics and Chemistry of the Earth*, No. 35 July 2010, pp. 742–751. https://doi.org/10.1016/j.pce.2010.07.004

Olivier, D. (2018). "Cape Town water crisis: 7 myths that must be bust". *SABI Magazine-Tydskrif*, Vol. 10, No. 2, pp. 26–27.

Sayl, K. N., Muhammad, N. S., Yaseen, Z. M., and El-shafie, A. (2016). "Estimation the Physical Variables of Rainwater Harvesting System Using Integrated GIS-Based Remote Sensing Approach". *Water Resources Management*, Vol. 30, No. 9, May 2016, pp. 3299–3313. https://doi.org/10.1007/s11269-016-1350-6

Schwilch, G., Bachmann, F., and de Graaff, J. (2012). "Decision support for selecting SLM technologies with stakeholders". *Applied Geography*, No. 34, pp. 86–98. https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2011.11.002

Su, M.-D., Lin, C.-H., Chang, L.-F., Kang, J.-L., and Lin, M.-C. (2009). "A probabilistic approach to rainwater harvesting systems design and evaluation". *Resources, Conservation and Recycling*, No 53, 393–399. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2009.03.005

IAHR **AIIH**

XXVIII CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA
BUENOS AIRES, ARGENTINA, SEPTIEMBRE DE 2018

EVALUACIÓN DE LA POLÍTICA DE DISTRIBUCIÓN DEL AGUA SUPERFICIAL DE LA CUENCA LERMA CHAPALA A 13 AÑOS DE SU IMPLEMENTACIÓN

[1]Ma. del Carmen Barragán B., [2]Ana I. Wagner G., [3]Raúl López C., y [4]Ruperto Ortiz G.
[1]Consultora independiente, México, barragancarmen@gmail.com
[2]Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, IMTA, México, awagner@tlaloc.imta.mx
[3]Consultor independiente, México, raul.lopezc@conagua.gob.mx
[4]Universidad Autónoma de Zacatecas, Unidad Académica de Ingeniería, ortizgr@uaz.edu.mx

RESUMEN:

La cuenca Lerma-Chapala es considerada una región determinante en la dinámica socioeconómica de México, cuyo desarrollo ha generado en el sector hídrico una problemática variada y compleja. Para tratar de solucionar dicha problemática, en 2004 se firmó un Convenio de distribución del agua superficial, en donde se establecieron las reglas para distribuir el agua a los usuarios de la cuenca, implantándose la política de distribución óptima conjunta, POC, elaborada para determinar el volumen anual autorizado a cada usuario, considerando un almacenamiento mínimo en el lago de Chapala de 2 000 hm^3 y garantizando a todos los usuarios al menos el 50% de su volumen concesionado. En este documento se presenta el desempeño de la POC a trece años de instituir su uso, encontrándose que a pesar de que las precipitaciones en el periodo han sido similares o menores a las ocurridas antes de su implementación, la política ha logrado mantener el almacenamiento del lago de Chapala por arriba del nivel establecido y suministrar a todos los usuarios volúmenes mayores al mínimo garantizado sin incurrir en déficit.

ABSTRACT:

The Lerma-Chapala Watershed is considered a crucial region in the socioeconomic dynamics of Mexico, where development has generated in the water sector varied and complex problems. To try to solve the problem, in 2004 an agreement for distribution of surface water was signed, where the rules are established to distribute the water to the users of the watershed, implanting the joint optimal distribution policy, (POC, for its acronym in Spanish), elaborated to determine the annual volume authorized to each user, considering a minimum storage at lake Chapala of 2 000 hm^3 and ensuring all users at least 50% of its concessioned volume. In this work we present the performance of the POC to 13 years to establish its use, finding that in spite of the rainfall in the period were similar or lower than those occurring before its implementation, policy has managed to maintain storage of lake Chapala above the established level and to provide all users larger volumes to a minimum guaranteed without incurring deficits.

PALABRAS CLAVES: Política de distribución; Cuenca Lerma-Chapala; Modelo Lerma; Modelo Simop

INTRODUCCIÓN

La cuenca Lerma-Chapala es una de las regiones más importantes de México, considerada como determinante en el desarrollo socioeconómico del país, por su densidad demográfica y su producción industrial y agrícola per cápita, que son superiores a la media nacional. En la cuenca se ubica el vaso natural de mayores dimensiones del país y tercero en Latinoamérica: el lago de Chapala.

El desarrollo de la región ha traído consigo una problemática variada y compleja en el sector hídrico, existiendo una fuerte competencia por el agua entre los diferentes sectores usuarios y entidades federativas. La cuenca está clasificada como la zona con el mayor índice de aprovechamiento del agua en México.

La cuenca Lerma-Chapala presenta un déficit hídrico, debido a que las demandas de los usuarios exceden la disponibilidad real del recurso, afectando a los usuarios y al ecosistema, principalmente al lago de Chapala, que por su ubicación geográfica, refleja lo que ocurre a lo largo del río Lerma en cuanto a usos y abusos del agua en cantidad y calidad, reflejando en su aspecto y evolución el crecimiento de las demandas aguas arriba y el efecto de las descargas sin tratamiento previo.

El desequilibrio entre la oferta y la demanda del agua, es producto del incremento sostenido de las extracciones, principalmente de riego, el uso más importante en la región. En los años setenta, como resultado de un período húmedo favorable, se ampliaron las zonas de riego, que sin tener derecho al servicio se convirtieron en demandantes del recurso. Esta situación fue propiciada y alentada por el impulso que se brindó en aquella época a la utilización de aguas excedentes. A la par con el crecimiento de las zonas de riego, no se previó una política de operación de la infraestructura hidráulica acorde con la situación y que fuera funcional tanto para épocas de abundancia como de escasez (CCES, 1991).

A finales de la década de los ochenta se agravó el problema hídrico, debido a la disminución de la precipitación. Para dar respuesta a la problemática expuesta, en 1989, los gobernadores de los estados de Guanajuato, Jalisco, México, Michoacán y Querétaro y el Ejecutivo Federal firmaron un Acuerdo, a fin de llevar a cabo el programa de ordenamiento de los aprovechamientos hidráulicos y el saneamiento de la cuenca Lerma-Chapala. Para dar seguimiento y vigilar el cumplimiento del Acuerdo, se constituyó un Consejo Consultivo, el primer Consejo de Cuenca en México, del cual se han derivado experiencias importantes para mitigar los problemas entre los usuarios, mediante la firma en 1991 de un Acuerdo de Distribución de Aguas Superficiales y el avance en materia de saneamiento de aguas residuales municipales de la región Lerma y del lago de Chapala.

No obstante, la aplicación del acuerdo de distribución firmado en 1991, un nuevo periodo de lluvias menores a la media ocasionó el descenso de los niveles del lago de Chapala, reportándose en julio de 2002 el almacenamiento más bajo registrado en los últimos 50 años. Esto incrementó la presión para formular nuevas reglas para la asignación del agua superficial con el fin de restablecer efectivamente el equilibrio de la cuenca y la recuperación del lago.

Para analizar de forma integral la problemática y proponer soluciones, en 2002 se desarrollaron dos modelos computacionales complementarios: un modelo dinámico de simulación, Lerma, y un modelo de optimización, Simop, utilizados para evaluar y explorar el efecto de diversas alternativas de solución para el manejo del agua ante posibles escenarios hidrológicos futuros (IMTA, 2003).

En el proceso de búsqueda de alternativas para enfrentar los problemas de disponibilidad de agua en la cuenca, destaca el proceso de negociación para la distribución del agua superficial entre la Comisión Nacional del Agua (Conagua), los representantes del gobierno de los estados y de los usuarios involucrados. Los análisis de las alternativas planteadas se realizaron a través de consensos en el seno del Grupo de Ordenamiento y Distribución, GOD, integrado por especialistas representantes de Conagua, de los estados y de los diferentes usuarios del agua.

Como resultado de los trabajos realizados, se elaboró un nuevo algoritmo consensuado para distribuir el agua superficial de la cuenca, el cual se utilizó para el nuevo convenio de distribución del agua superficial en la cuenca, denominado “Convenio de Coordinación y Concertación que

celebraron los Estados de Guanajuato, Jalisco, México, Michoacán y Querétaro, así como los representantes de los usuarios de los usos público urbano, pecuario, agrícola, industrial, acuícola y servicios, para llevar a cabo el Programa sobre la Disponibilidad, Distribución y Usos de las Aguas Superficiales de Propiedad Nacional del Área Geográfica Lerma-Chapala". El nuevo convenio de distribución del agua superficial se firmó el 14 de diciembre de 2004 y fue publicado en el diario Oficial de la Federación el 8 de abril de 2014 como Decreto de aplicación obligatoria.

La política de distribución establecida en el convenio, fue denominada Política Optima Conjunta, POC, debido a que se determinó optimizando el manejo conjunto del sistema. La POC ha operado desde su firma hasta la fecha, realizándose modificaciones únicamente a la política de distribución del distrito de riego 085 (DR085), ya que debido a la capacidad de almacenamiento de las fuentes de suministro y a la alta variabilidad en el escurrimiento generado en la subcuenca Begoña, resulta inviable el otorgar el volumen máximo concesionado al DR085, por lo que después de firmado el convenio de distribución se buscaron alternativas acordes a las condiciones del DR085.

El objetivo de este trabajo es evaluar el desempeño de la POC a trece años de su aplicación en la cuenca Lerma Chapala, verificando el cumplimiento de las condiciones establecidas al determinar la política.

CARACTERÍSTICAS DE LA CUENCA LERMA CHAPALA

La cuenca Lerma Chapala se localiza en la zona centro-oeste de México, con una superficie aproximada de 58,725 km^2, incluyendo dos subcuencas cerradas. Dentro de la cuenca quedan comprendidos parcialmente los estados de Guanajuato, Jalisco, Estado de México, Michoacán y Querétaro, figura 1.

Esta zona es una de las regiones económicas más importantes de México, debido a que su producción industrial y agrícola, son superiores a la media nacional. La superficie agrícola con infraestructura de riego es del orden de las 800 000 hectáreas (IMTA, 2002). Además, dentro de la cuenca se encuentra el lago de Chapala, el más grande de México, que tiene una superficie de 1 189 km^2 y una capacidad de almacenamiento de 8 125 hectómetros cúbicos.

La precipitación media anual en la cuenca es de 722 mm, con variaciones anuales entre 460 y 1 070 mm. La precipitación se concentra principalmente en la parte sur de la cuenca. Este régimen de precipitación da a la región un clima semi-árido con lluvias en verano. El escurrimiento promedio anual es de 4 908 hectómetros cúbicos (DOF, 2006).

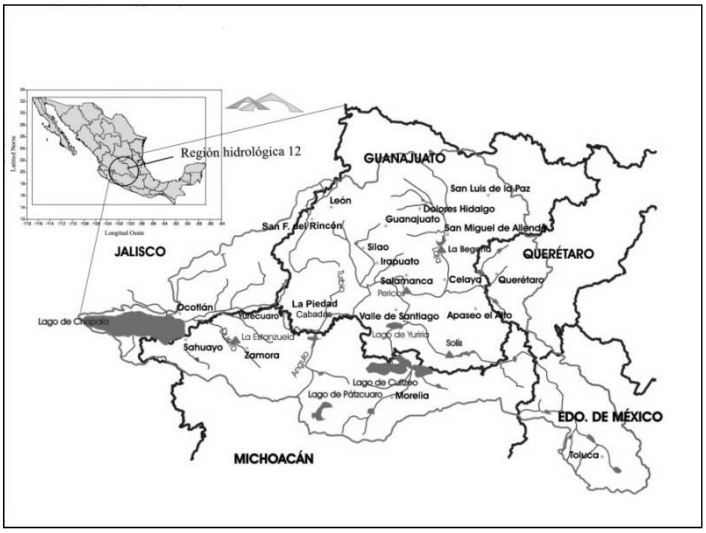


Figura 1.- Cuenca Lerma Chapala.

MODELOS DE SIMULACIÓN

La representación de la cuenca en los dos modelos elaborados: *Lerma* y *Simop*, está integrado por las 17 subcuencas en que se subdivide la cuenca. Para modelar individualmente los pequeños almacenamientos y bordos existentes aguas arriba del punto de control de una subcuenca, cuyo efecto en el sistema es importante y no puede ser ignorado, se agregó en cada subcuenca un elemento denominado *presa virtual o equivalente*, el cual, es la fuente de abastecimiento de la pequeña irrigación y tiene una capacidad de almacenamiento igual a la suma de la capacidad de los pequeños almacenamientos y bordos en la subcuenca.

Los elementos modelados para representar el sistema Lerma Chapala corresponden a los ocho principales almacenamientos, la laguna de Yuriria, el lago de Chapala, dos presas de derivación denominadas nodos, ocho estaciones hidrométricas, consideradas como puntos de control, 15 presas virtuales, una para cada subcuenca, ocho distritos de riego y el volumen concesionado para abastecer a la ciudad de Guadalajara, figura 2.

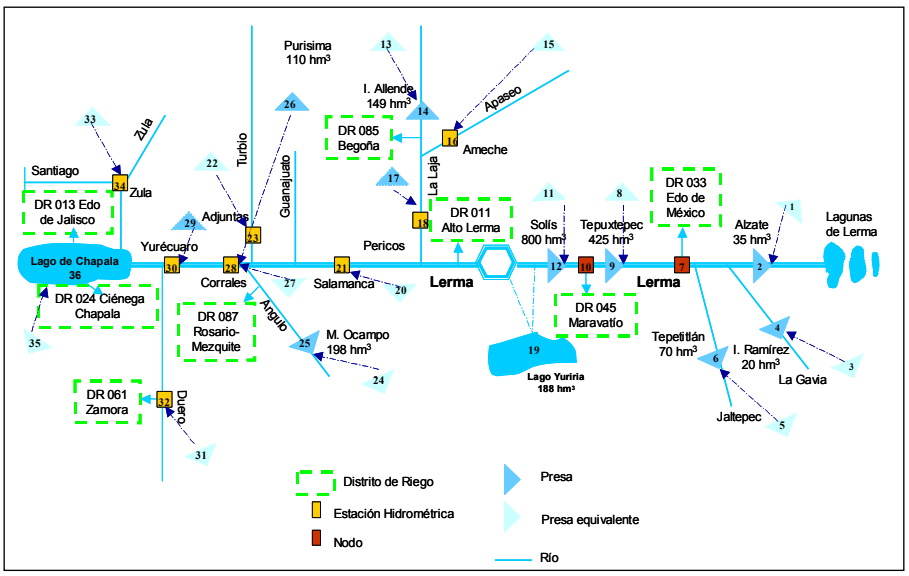


Figura 2.- Diagrama unifilar del sistema Lerma-Chapala.

***Modelo Lerma*:** Debido a las ventajas de la modelación orientada a objetos, para construir el modelo de simulación dinámica se seleccionó la plataforma Stella® Research (Structural, Thinking, Experimental, Learning, Laboratory with Animation). Este modelo está conformado por un conjunto de módulos: el escurrimiento diario se calcula empleando el método del Servicio de Conservación de Suelos (SCS) de los Estados Unidos, los requerimientos hídricos de los cultivos empleando el método de Flinn. Otros módulos son el de funcionamiento de vasos y políticas de distribución, entre otros; integrados para establecer el balance de agua en la cuenca. En la figura 3 se muestra el menú principal del modelo y la interfaz a los módulos de simulación de los elementos modelados en cada subcuenca.

Figura 3.- Menú principal e interfaz a los módulos de simulación en el modelo Lerma.

El modelo opera simulando el comportamiento diario de la cuenca, por un periodo de 52 años, reportando los niveles en el lago y los volúmenes entregados a los usuarios en el ciclo agrícola, desde el 1º de noviembre al 31 de octubre del siguiente año, utilizando series de precipitación diaria (IMTA, 2002).

***Modelo Simop*:** Este modelo se desarrolló en Fortran y está compuesto de un simulador y de un optimizador; el simulador calcula el funcionamiento de los almacenamientos al aplicarse una política de operación a cada elemento, de acuerdo con la topología y restricciones que caracterizan al sistema, evalúa la función objetivo y proporciona al buscador la respuesta obtenida para el conjunto. El optimizador o buscador es un algoritmo genético, que utiliza las respuestas del simulador para generar nuevas propuestas que tienden a la respuesta óptima, lo cual ha mostrado ser capaz de ofrecer buenas respuestas ante situaciones dinámicas y no lineales (IMTA, 2003).

La función objetivo planteada en el modelo de optimización maximiza la extracción anual de agua programada para el ciclo agrícola y minimiza el déficit de agua entre el volumen propuesto y la extracción posible, para todo el periodo histórico, fijando el nivel de almacenamiento mínimo del lago de Chapala en un nivel deseable. El modelo opera simulando el comportamiento mensual de la cuenca, por un periodo de 52 años, utilizando los escurrimientos generados en el modelo dinámico Lerma ya que ambos modelos son complementarios.

La forma complementaria en que han operado los dos modelos es notable, para conseguir el objetivo de hallar reglas óptimas de operación para el sistema de cuenca elegido, que en este caso corresponde a la cuenca del río Lerma, conocida como Lerma-Chapala.

POLÍTICA ÓPTIMA CONJUNTA, POC

Es una política variable con déficit cero, caracterizada por una función que depende de los escurrimientos registrados en el año antecedente, la cual se emplea para determinar la extracción para los distritos de riego y para la pequeña irrigación.

Una política variable es una curva característica como la que se muestra en la figura 4, y se compone de los siguientes parámetros: volumen mínimo de extracción (*VDMIN*) u ordenada al origen, establecido como el 50% del volumen concesionado; volumen máximo de extracción (*VDMAX*), correspondiente al 100% del volumen concesionado; incremento de extracción dado por la pendiente de la recta característica de la política (β); volumen de escurrimiento antecedente (V_1), a partir del cual se incrementa el volumen mínimo de extracción en función de β; y V_2 el volumen a partir del cual se extrae la totalidad del volumen concesionado, siendo $V_2 = V_1 + (VDMAX\text{-}VDMIN) / \beta$.

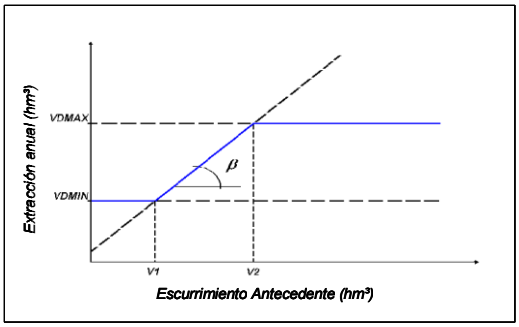


Figura 4.- Curva característica de una política óptima de asignación.

Con estos parámetros el volumen a extraerse se calcula mediante la siguiente expresión algebraica:

$$VE = VDMIN \quad \text{si} \quad ESCA \leq V1$$
$$VE = VDMIN + \beta\,(ESCA - V_1) \quad \text{si} \quad V1 < ESCA < V2$$
$$VE = VDMAX \quad \text{si} \quad ESCA \geq V2$$

donde: *VE* es el volumen autorizado de extracción, y *ESCA* es el escurrimiento anual antecedente. Los parámetros *V1* y β para cada uno de los almacenamientos se determinan mediante el modelo de optimización *Simop*.

Volumen utilizado no autorizado

Debido a que existen antecedentes de que algunos usuarios ocasionalmente han empleado volúmenes mayores a los autorizados, el convenio de distribución vigente establece que para evitar que colapsen cultivos en pie, las autoridades determinarán la posibilidad de conceder un volumen adicional al inicialmente autorizado por la POC, supeditado a que el volumen adicional otorgado se reste del volumen autorizado en el siguiente ciclo agrícola (CCLCH, 2004). Por lo que, adicional al volumen autorizado se estableció el volumen asignado, que corresponde al volumen autorizado menos el volumen usado en exceso en el ciclo anterior.

Políticas del DR085

Los representantes del DR085 seleccionaron una política en función del escurrimiento antecedente y el almacenamiento en la presa el 1° de noviembre, sin garantía. Esta política operó de 2008 a 2010, pero no resultó ser benéfica para el distrito, por lo que los representantes del DR085 en 2010 seleccionaron una política dependiente del almacenamiento en la presa el 1° de noviembre, sin garantía y deficitaria, argumentando que esta política les permite incrementar el volumen de extracción. La nueva política se ha aplicado de 2010 a la fecha.

ANÁLISIS DE LA OPERACIÓN DE LA POC

Resulta conveniente realizar una evaluación del desempeño de la política de distribución aplicada en la cuenca de 2004 a la fecha, para verificar el cumplimiento de los objetivos impuestos al determinarla:

- Volumen almacenado en el lago de Chapala superior a 2 000 hm^3.
- Garantizar a cada usuario un volumen mínimo de entrega del 50% del volumen máximo concesionado sin incurrir en déficit.

Para realizar este análisis se usaron los datos empleados por la Conagua para el cálculo del escurrimiento anual restituido de 2004 a 2015.

Desempeño de la política de distribución

A trece años de implementarse el uso de la POC, a pesar de que las precipitaciones en el periodo han sido similares o menores a las ocurridas antes de su implementación (figura 5), la política ha logrado mantener el almacenamiento del lago de Chapala por arriba del nivel mínimo aceptable (2 000 hm^3), figura 6, y suministrar a todos los usuarios volúmenes mayores al volumen mínimo garantizado sin incurrir en déficit.

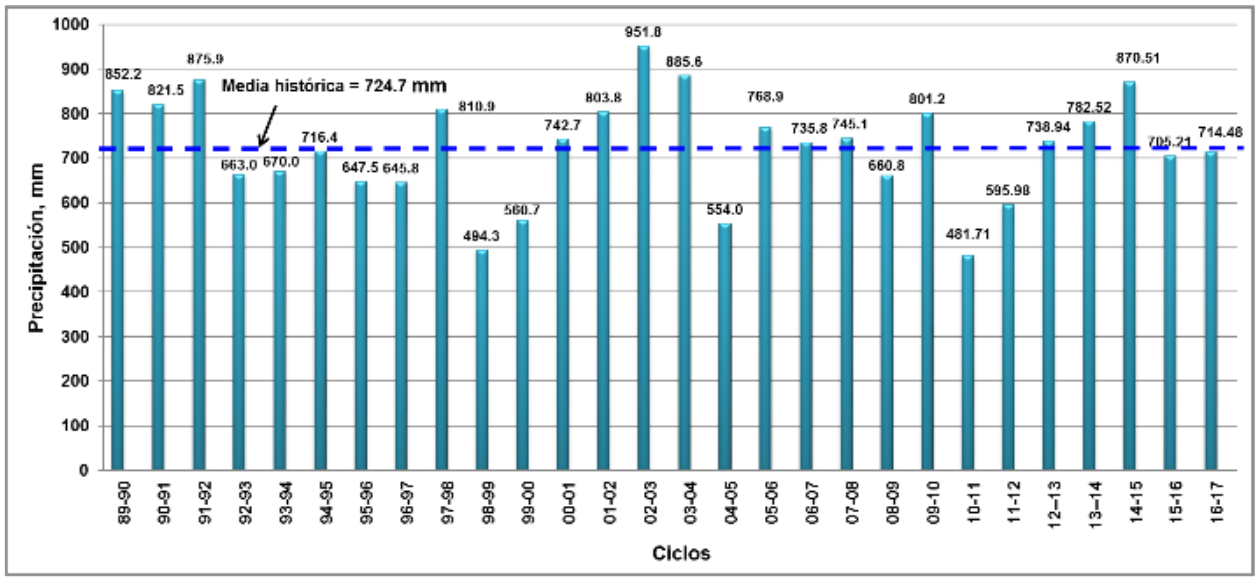


Figura 5.- Precipitación anual en la cuenca Lerma-Chapala.

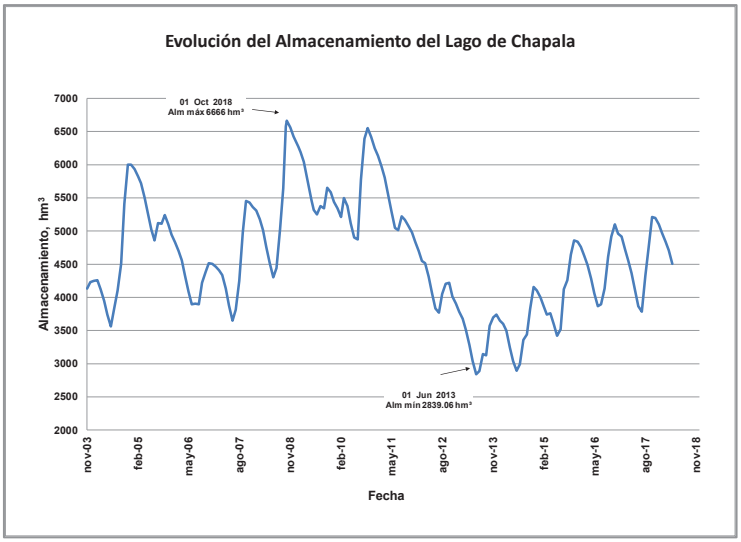


Figura 6.- Evolución del almacenamiento del lago de Chapala.

Cumplimiento del nivel de garantía y seguridad de abasto

En el periodo en que ha operado la POC, a excepción del DR085 que modificó su política de distribución por una política función del almacenamiento sin garantía, todos los distritos de riego han contado con un volumen autorizado igual o mayor al volumen mínimo garantizado (50% del volumen máximo concesionado). En la figura 7 se exhibe la relación entre el volumen autorizado y el volumen máximo que puede adjudicarse a cada distrito de riego a partir de la entrada en vigor del Convenio.

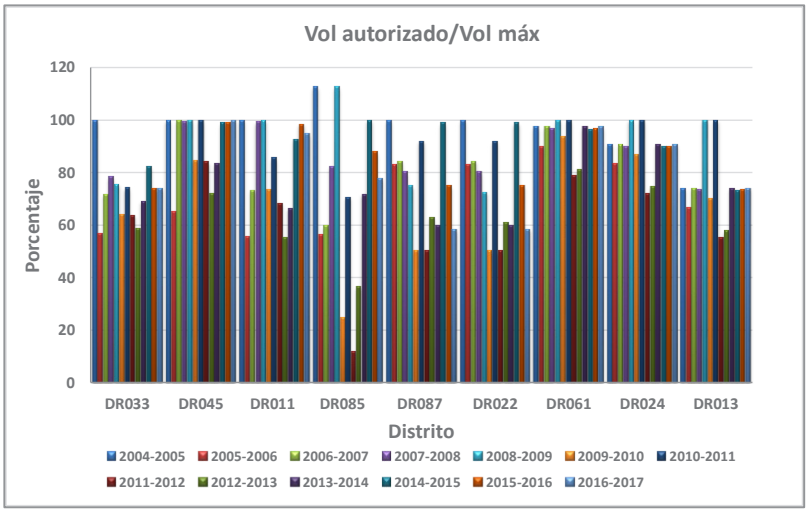


Figura 7.- Relación del volumen autorizado y el volumen máximo a otorgarse.

Por lo que respecta a la seguridad de abasto, en todos los ciclos se ha contado con el volumen de almacenamiento suficiente para garantizar el volumen autorizado. En la figura 8 se presenta la relación del volumen utilizado entre el volumen asignado (en porcentaje) a los distritos de riego.

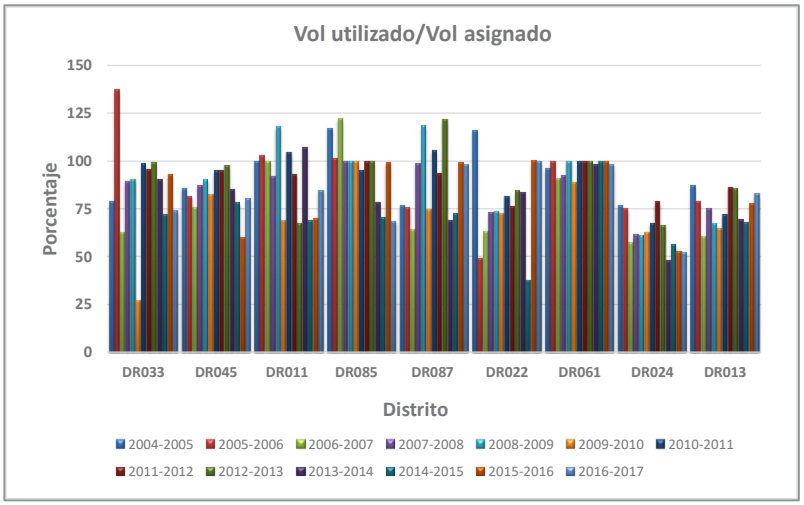


Figura 8.- Relación volumen utilizado y volumen asignado.

En la figura 8 se observa que existen ciclos agrícolas en los que el porcentaje del volumen utilizado respecto del asignado es mayor al 100%, esto se debe a que en esos ciclos se otorgaron volúmenes en préstamo para salvar las cosechas. Adicionalmente, puede observarse que en algunos ciclos el volumen asignado no se consume en su totalidad, lo cual obedece a que el volumen de precipitación ocurrido en el ciclo agrícola excedió el volumen de precipitación empleado al elaborar el plan de riegos, por lo que no se requirió extraer la totalidad del volumen asignado.

Resumen del volumen promedio autorizado y utilizado por cada distrito de riego, DR

En la tabla 1 se presentan los valores promedio del volumen autorizado, asignado y utilizado por cada uno de los distritos de riego, en el periodo de aplicación del Convenio firmado en 2004.

Tabla 1.- Volumen promedio de cada distrito de riego, en el periodo de aplicación de la POC.

DR	Volumen máximo hm^3	Volumen promedio, hm^3				Vol Aut/Vol máx %	Vol Uti/Vol máx %
		Autorizado	Asignado	Utilizado	Excedido		
DR033	**90**	65.2	63.7	54.0	1.5	72.46	60.04
DR045	**90**	82.1	82.1	68.7	0.0	91.28	76.36
DR011	**955**	780.2	763.7	695.3	20.5	81.70	72.81
DR085	**110**	76.5	73.7	70.2	2.8	69.56	63.84
DR087	**232**	172.9	169.6	151.2	5.8	74.54	65.17
DR022	**8**	5.9	5.8	4.4	0.1	74.19	55.30
DR061	**200**	188.2	188.1	182.4	0.1	94.10	91.20
DR024	**170**	150.2	150.2	93.7	0.0	88.36	55.10
DR013	**150**	111.4	111.4	82.7	0.0	74.29	55.16

Los resultados en la tabla 1 muestran que normalmente los distritos de riego emplean volúmenes menores a los autorizados, siendo el DR013 el que utiliza el menor porcentaje del volumen autorizado, mientras que el DR061 utiliza casi la totalidad de su volumen autorizado.

Aprovechamiento del agua

En la figura 9 se presenta el aprovechamiento del agua en la cuenca, que relaciona el volumen total utilizado, que corresponde al volumen suministrado a todos los usuarios más las evaporaciones registradas en los principales almacenamientos, relacionándolo con el escurrimiento total registrado en la cuenca, pudiéndose apreciar que en algunos años el aprovechamiento total es mayor del 100%, lo que indica que la política efectivamente ha cumplido con uno de sus objetivos planteados: garantizar un volumen mínimo independientemente del escurrimiento, ya que genera reservas en años con escurrimientos abundantes que pueden emplearse en los siguientes ciclos.

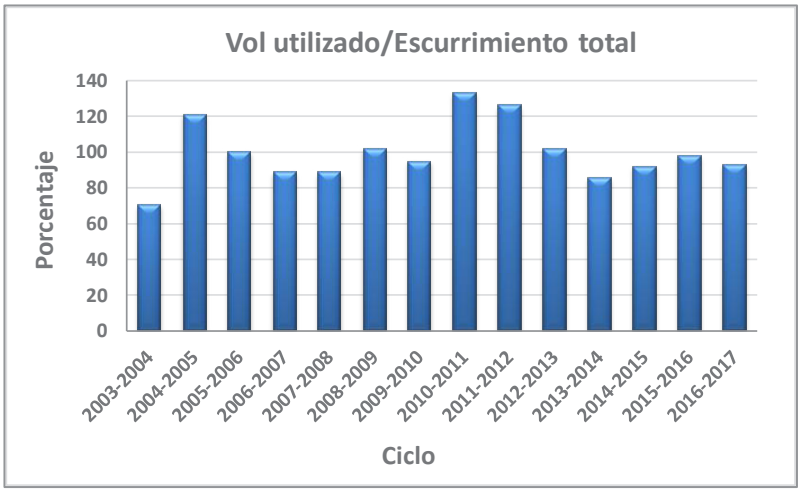


Figura 9.- Aprovechamiento del agua en la cuenca.

CONCLUSIONES

La política de distribución POC ha cumplido con los objetivos planteados, ya que el almacenamiento del lago de Chapala no ha registrado almacenamientos inferiores a los 2 800 hm^3, así mismo ha permitido mantener volúmenes almacenados en las presas suficientes para cumplir con el volumen autorizado en cada ciclo y suministrar el volumen mínimo garantizado a todos los distritos de riego, aún en los años con escurrimiento bajo. Además, ha permitido a las autoridades mantener la gobernabilidad hídrica de la cuenca.

REFERENCIAS

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, (2002), "Revisión y Adecuación del Modelo Dinámico de la Cuenca Lerma Chapala y Aplicación de Diversas Políticas de Operación y Manejo Integrado del Agua", Reporte Interno, México.

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, (2003), "Estudio para la actualización del acuerdo de distribución de aguas superficiales, mediante la complementación y formulación de nuevas reglas de asignación en la cuenca Lerma Chapala", Reporte Interno, México.

Consejo Consultivo de Evaluación y Seguimiento (CCES), (1991), "Acuerdo de Coordinación de Aguas Superficiales", Colección Lerma Chapala, Vol. 1, No. 5, México, Marzo.

Consejo de Cuenca Lerma Chapala, Comisión Nacional del Agua (CCLCH), (2004), "Convenio de coordinación y concertación que celebraron el Ejecutivo Federal y los Ejecutivos de los Estados de Guanajuato, Jalisco, México, Michoacán y Querétaro, y los representantes de los usuarios de los usos público urbano, pecuario, agrícola, industrial, acuícola y servicios, para llevar a cabo el programa sobre la disponibilidad, distribución y usos de las aguas superficiales de propiedad Nacional del área geográfica Lerma-Chapala, México.

Comisión Nacional del Agua (Conagua), (2004-2015), "Restitución anual de escurrimientos".
Diario Oficial de la Federacion (DOF), (2006), "Acuerdo por el que se da a conocer el estudio técnico de los recursos hídricos del área geográfica Lerma-Chapala". Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). Diario Oficial de la Federación. México, D. F. Julio de 2006.

IAHR **AIIH**

XXVIII CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA
BUENOS AIRES, ARGENTINA, SEPTIEMBRE DE 2018

AS PERDAS NA TRAJETÓRIA DE UMA CIDADE

Daniel Bezerra Barros[1], Michele Dos Santos Lopes Cerqueira[2], Bruno de Melo Bretan[3] e Lubienska Cristina Lucas Jaquiê Ribeiro[4]

[1]Universidade de Campinas, Brasil, danielbezerrab@gmail.com
[2]Universidade de Campinas, Brasil, sl.michele@gmail.com
[3]CRAN, Université de Lorraine, France, brunocivil08@gmail.com
[4]Universidade de Campinas, Brasil, lubi@ft.unicamp.br

RESUMO

Dentre as dificuldades na gestão de um sistema de abastecimento de água, reduzir o índice de perdas mostra-se uma tarefa árdua. Essas perdas ocorrem devido a problemas nas tubulações de adução e distribuição, nas juntas, válvulas, hidrantes, tanques de armazenagem e reservatórios. Um levantamento nacional mostrou que a média brasileira de perdas se encontrava a 36,7%, por outro lado, o mesmo levantamento destacou a cidade de Limeira/SP por apresentar os menores índices do país, cerca de 15%. Buscando encontrar os fundamentos que levaram esta cidade a se tornar referência na gestão de perdas, a pesquisa explora toda a trajetória do sistema de abastecimento da cidade, enfatizando as estratégias de algumas decisões que se realçam nessa conquista, desde a inauguração dos primeiros chafarizes, ainda em 1845, e todo o percurso que a população e os gestores percorreram até se destacar, em 2015, com o menor índice de perdas. Provando que a eficácia de um sistema de abastecimento de agua é alcançada pela realização eficiente dos processos, métodos e instalações.

ABSTRACT

Among the difficulties in managing a water supply system, reducing the loss index is an arduous task. These losses occur due to problems in the adduction and distribution piping, gaskets, valves, hydrants, storage tanks and reservoirs. A national survey showed that the Brazilian average of loss was 36.7%; on the other hand, the same survey highlighted the city of Limeira / SP, because it had the lowest indexes in the country, around 15%. Seeking to find the foundations that led this city to become a reference in the management of losses, the research explores the whole trajectory of the town's supply system, emphasizing the strategies of some decisions that have been highlighted in this conquest since the inauguration of the first fountains, back in 1845, and the path that the population and the managers went through until it finally stood out, in 2015, with the lowest loss rate, proving that the effectiveness of a water supply system is achieved by efficiently performing the processes, methods and facilities.

PALAVRAS CHAVES: *Redes de abastecimento; Controle de perdas; gestão de sistemas de abastecimento.*

1. INTRODUÇÃO

Analisar a trajetória das perdas de água em um sistema de abastecimento no Brasil, significa mostrar a história de gestão desse sistema. Diversos autores, na sua maioria engenheiros e gestores, como: Farley and Trow (2003), Wu and Sage (2008), Barroso e Gastaldini (2010), Hunaidi and Wang (2006), desenvolveram estudos sobre o tema, para analisar o processo de gestão de sistemas a partir do índice de perdas. De forma geral, mostram como as perdas diminuíram ao longo dos anos, contrariando o senso comum sobre a realidade brasileira.

A *International Water Association* (IWA) retrata, que em 1991, a média mundial de perdas de água reais e aparentes nos sistemas de abastecimento estava entre 20-30% da água tratada (Hunaidi et al. 2000). No Brasil, um levantamento realizado pelo Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), mostra que o país obteve um índice de perdas na distribuição, nos anos de 2014 e 2015, manteve-se a 36,7% em ambos, este índice faz uma comparação entre o volume disponibilizado e o volume consumido. Esses vazamentos podem ocorrer devido a problemas nas tubulações de adução e distribuição, nas juntas, válvulas, hidrantes, tanques de armazenagem e reservatórios (Hunaide, 2004). Essa problemática além de gerar perdas econômicas para as empresas gestoras e a população, podem gerar riscos à saúde pública e infraestruturas das fundações e estradas (Pal, 2010).

Os dados apresentados pelo SNIS realçam algumas cidades brasileiras frente ao índice de perdas (Figura. 1). Algumas capitais estaduais se destacam por apresentarem índices maiores que a média nacional, em que Belém e Manaus, capitais do Pará e Amazonas respectivamente, encontra-se com índices próximos a 50% e Cuiabá, capital de Mato Grosso, com as perdas superando os 65%. Por outro lado, algumas cidades, Limeira e Ribeirão Preto, são apontadas por ostentar índices de perdas abaixo dos 20%, consideração importante diante do cenário do país.

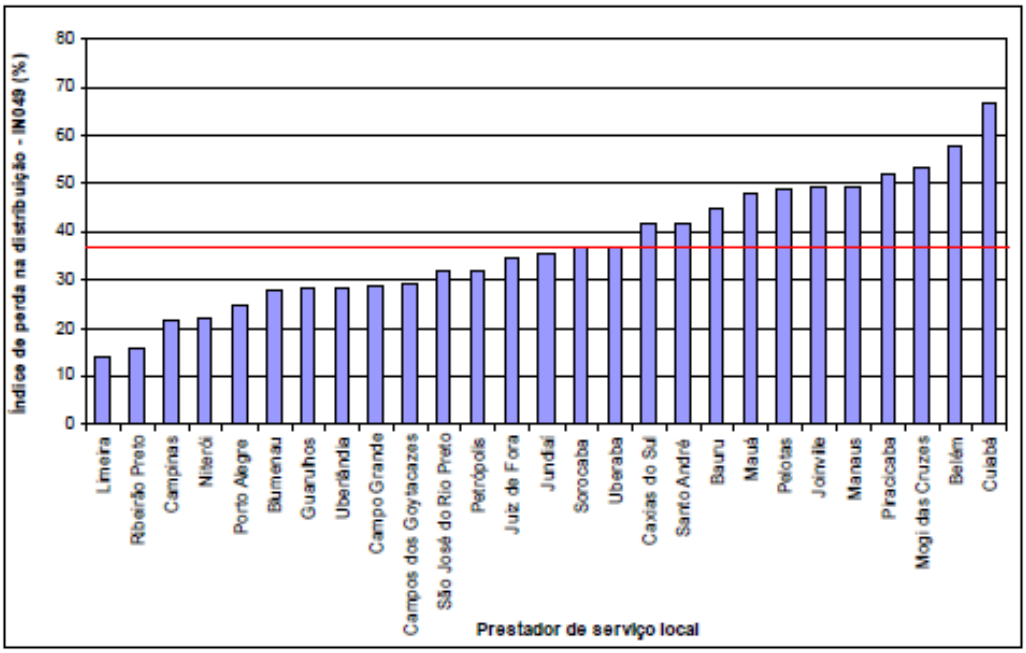


Figura 1.- Índice de perdas na distribuição – 2014 (SNIS)

Limeira, localizada no estado de São Paulo, apresentou nos anos de 2014 e 2015 o índice de perdas na distribuição um valor de 14,08% e 15,94%, respectivamente, em uma rede que continha, uma extensão de 1.139 km e 98.700 ligações de água. Para compreender os fundamentos que levaram esta cidade a se tornar referência na gestão de perdas de água no Brasil, propõe-se nessa pesquisa explorar os percursos que a população e os governantes percorreram até sua consagração.

2. A CIDADE: LIMEIRA/SP

Em 1809 já havia moradores na região onde está localizada a cidade de Limeira (Figura 2) (REPE, 2017), mas somente em 1824 é que foi denominado Povoado de Nossa Senhora das Dores do Tatuiby. Foi um grande centro cafeicultor e uma região propícia a lavoura de frutas cítricas e cana de açúcar, onde houve a instalação de um dos primeiros e maiores núcleos de colonização do Brasil, região que também se tornou conhecida por abrir as lavouras mecanizadas em terras brasileiras, ainda em 1858. A emancipação só ocorreu em 1863, tornou-se a cidade, localizada a 154 quilômetros da capital do estado de São Paulo e tornou-se na *Capital da Laranja e Berço da Citricultura Nacional* (REPE, 2017).

Figura 2.- Localização de Limeira no estado de São Paulo (Google Maps, 2018).

A cidade está localizada nas terras que pertenceram à Fazenda Ibicaba, considerada a maior produtora de café do mundo no século XIX. Fazenda que pertenceu ao Senador Nicolau Pereira de Campos Vergueiro e era visitada por pessoas importantes de diversos países, como os monarcas: Príncipe Heinrich V. Preussen da Prússia e a Princesa Isabel do Brasil (Heflinger, 2005). O Senador Vergueiro contribuiu com o desenvolvimento da região, importando mão de obra estrangeira, ocorrendo a substituição gradativa da mão de obra escrava por imigrantes europeus. Em 1840 chegaram os primeiros imigrantes, cerca de 90 portugueses, após alguns anos chegaram mais 400 colonos dos condados onde hoje se encontra a Alemanha e, em 1854, chegaram mais de 200 imigrados suíços e prússios. Tornando a Fazendo Ibicaba a primeira colônia de cunho particular do Brasil (Heflinger, 2007).

2.1 Marcos: 1900-1963

As primeiras obras relacionadas ao abastecimento de água na cidade, concluíram-se em 1845, quando foram ligados os encanamentos em 3 chafarizes localizados em praças pela cidade. Mesmo por estar localizada em uma área com grande disposição de recursos hídricos (Figura 3), as próximas etapas para melhoria do abastecimento ocorreram apenas em 1900, quando começou a captação de mananciais em fazendas próximas e os serviços de encanamentos no município e nas construções. Porém, a qualidade da água captada era comprometida pelas habitações ribeirinhas ao manancial, havendo a remoção de 48 casas no ano seguinte (REPE, 2017).

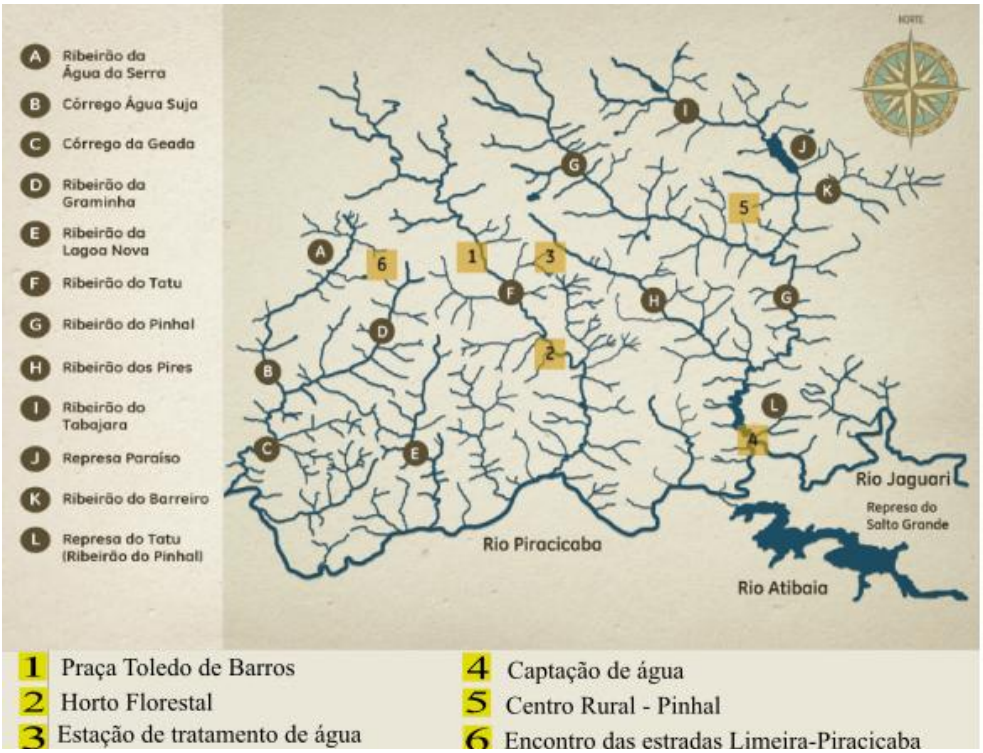


Figura 3.- Mapa dos Recursos Hídricos de Limeira (PMRH - adaptado)

Em 1912, ocorreu a conclusão da construção da primeira represa para captação, represa de Cascalho e a adutora, que fazia ligação a um reservatório de acumulação suficiente para o abastecimento da pequena cidade. Ocorreu a necessidade de complementação no sistema de abastecimento com a perfuração de 3 poços artesianos em 1950 e a substituição da represa de Cascalho pela represa de Graminha em 1960 (REPE, 2017).

2.2 Marcos: 1964-1995

As maiores realizações para o abastecimento de água, decorreram mediante uma estiagem em 1964, considerada como a maior do século. Neste ano a cidade já possuía 70 mil habitantes, sendo necessária a conclusão acelerada da represa de São Bento e as obras para captação com tratamento do rio Jaguari, localizada a 15,5 quilômetros da cidade. Ainda assim, houve a necessidade da construção de poços pelos habitantes mais abastados da cidade, onde a água era compartilhada com a vizinhança, este ato foi considerado como umas das mais belas páginas de solidariedade humana que o interior do estado presenciou (REPE, 2017).

Com o propósito de resolver os problemas acarretados pela estiagem, foram necessárias a elaboração de estudos topográficos, execução de adutoras, estação de tratamentos, reservatórios, interligação das redes e estudos nos mananciais da região capazes de atender as demandas da população. As resoluções desses problemas ganharam forças no ano seguinte, com a criação do Grupo Executivo do Fundo de Financiamento para Abastecimento de Água, que foi uma parceria entre Brasil e Estados Unidos da América, em que se lançava bases avançadas e seguras para a solução de problemas relacionados ao abastecimento (REPE, 2017).

Para a administração dos recursos adquiridos, sobreveio a criação, em 1966, da autarquia municipal de Serviços Autônomos de Água e Esgoto (SAAE), que direcionou esses investimentos para melhorias das estações de captação, inicialmente foram instaladas 3 bombas de captação com capacidade de 250 L/s e a ampliação das canalizações e adutoras para tubos de até 600 milímetros. Dois serviços ganharam destaque nessa nova etapa do abastecimento da cidade, decorrendo a criação da Estação de Tratamento de Água (ETA) e a produção de 3 reservatórios, um com capacidade de 2 mil metros cúbicos, localizado na ETA, e dois com capacidade de mil metros cúbicos estabelecidos na cidade (REPE, 2017). Porém, com a ligação das bombas no dia anterior a

inauguração da ETA e dos reservatórios, ocorreu um rompimento na canalização, sendo recuperado durante a madrugada, ainda assim, a inauguração ocorreu sem a chegada da água, em ambas as construções, causado por vazamentos na tubulação nas proximidades da estação de tratamento (REPE, 2017).

Apesar dos problemas iniciais, a SAAE manteve-se até a década de 90, quando se achava em situações caóticas relacionadas a escassez de recursos, falta crônica de água, investimentos abandonados, altos índices de inadimplência, pouca reserva de água, Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) na faixa de 2% do total produzido, poluição da bacia hidrográfica da região e índice de perdas a 40% (REPE, 2017). Esses acontecimentos forçaram o poder público a autorizar, em maio de 1994, a concessão da rede de abastecimento de água e coleta e tratamento de esgoto para que fossem administradas por uma empresa privada, situação até então inédita no país. Essa circunstância destacou-se pela necessidade da elaboração de legislações, em que o poder público passava para função de fiscalizador e permaneceria proprietário de todas as instalações após o final do período de contrato, sem quaisquer ônus, e a empresa disponibilizaria de contrato, com prazo vigente de 30 anos, sendo remunerado pelas tarifas cobradas aos usuários (REPE, 2017).

2.3 Marcos: 1995-2017

Os trabalhos iniciais da empresa, no terceiro trimestre de 1995, deram prioridade nas resoluções de falta de água e melhora na coleta de esgoto (REPE, 2017). Para reduzir os vazamentos na rede, foram adquiridos equipamentos que auxiliaram na detecção de vazamentos não visíveis, realizados os reparos dos vazamentos visíveis, troca de hidrômetros, instalação de válvulas redutoras de pressão e altimétricas, instalação de macromedidores com o objetivo de gerir as perdas por setores, com esses serviços e outras melhorias, alcançaram um índice de perdas de 28% no primeiro trimestre de 1997 (REPE, 2017). A empresa alcançou, em 1998, as marcas de 100% do esgoto tratado, 27% de índices de perdas e 80% dos seus córregos urbanos despoluídos. A empresa adquiriu certificação pela norma ISO 9001 para todos os processos de produção, tornando-se a primeira empresa com essa certificação no setor de saneamento básico na América Latina (REPE, 2017).

Até então, a fiscalização era realizada por órgãos municipais e consistia na apresentação de relatórios trimestrais sobre a realização dos serviços. Mas, em 2007, foi sancionada a Lei Federal do Saneamento Básico, n° 11.445, que determina a regulação e fiscalização desses serviços sendo exercidas por empresas ou órgãos com capacidade técnica, independentes e com autonomia administrativa, financeira e decisória. Com isso, por meio de um consórcio público, foi criado a Agência Reguladora dos Serviços de Saneamento das Bacias dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí (ARES-PCJ) prestando serviços a 46 municípios.

Na busca da garantia do abastecimento a população, o município obteve a outorga para a captação superficial do Rio Jaguari e do Ribeirão Pinhal. E devido a estação de captação se encontrar na foz entre esses dois mananciais, possibilita a optação para a realização da captação, sendo feito pelo manancial que apresentar os melhores parâmetros de qualidade da água (Figura 4). O Rio Jaguari, possui maior vazão, porém a qualidade da água é reduzida nos períodos de estiagem, ocorrendo a captação do Ribeirão Pinhal que possui parâmetros qualitativos melhores e vazão menor. A captação é obtida em uma vazão média de 3m³/s, passando pela Estação Elevatória São Lucas e por uma torre de equilíbrio, percorrendo cerca de 16 quilômetros até a ETA (PMRH, 2016).

Figura 4.- Estação de Captação Rios Jaguari e Ribeira Pinhal (PMRH)

A ETA de Limeira (Figura 5) é capaz de produzir mais de 66 milhões de litros de água diariamente, essa produção dá-se pela operação com quatro módulos, em que todas as etapas de tratamento são reunidas, como coagulação, floculação, decantação e filtração, além do controle e adição de produtos químicos como cloro, flúor e ajuste do pH. Esse controle e dosagem também são realizados para a captação subterrânea, onde o sistema utiliza os poços São João e Tatu como contribuintes para o sistema de abastecimento (PMRH, 2016).

Figura 5.- Estação de Tratamento de Água (PMRH)

A empresa gestora administra quatro ETEs, que são: ETE Tatu, ETE Águas da Serra, ETE Lopes e ETE Graminha, que recebem juntas cerca de 665 litros por segundo. A estação Tatu (Figura

6) recebe maior volume do esgoto gerado pela população, 500 litros por segundo, operando com processo de tratamento primário, contando com as etapas de gradeamento, desarenador, decantador, adensador, desidratação e disposição final do lodo. Porém a estação mais moderna em uso é a ETE Água da Serra, recebendo 90 litros por segundo, em que opera com os processos de tratamento primário, secundário e terciário, contanto com tecnologia anaeróbia, aeróbia e desinfecção do afluente final por radiação ultravioleta. A ETE Água da Serra conta, desde 2012, com a utilização de água de reuso em seu processo, substituindo a água potável proveniente do próprio efluente tratado (PMRH, 2016).

Figura 6. - ETE Tatu (PMRH)

Apesar das obras e melhorias, a cidade declarou estado de emergência devido à crise hídrica que atingiu a região em 2014, quando a operação do Rio Jaguari estava com a taxa 82% menor que a média. A crise forçou a antecipação da construção de nova represa na bacia do Ribeirão Pinhal e a captar água da Represa Salto do Lobo onde foram necessárias obras de alteamento para ampliação da reserva de água. O baixo índice de perdas foi associado como ponto salvador nessa crise, pois haveria a necessidade de maior volume captado, caso os índices de perdas da cidade fossem maiores ou apenas seguissem a média nacional acima dos 30%. Posteriormente, comprovou-se assertivas as decisões tomadas pelos órgãos gestores e a conscientização populacional.

Logo em 2015, Limeira encontrava-se classificada como “Rumo à universalização” a melhor entre as três categorias apresentadas no Ranking ABES da Universalização do Saneamento, que avaliza condições de saneamento em relação à universalização das cidades brasileiras com população superior a 100 mil habitantes, por meio de indicadores, como o abastecimento de água, a coleta e tratamento de esgoto e a coleta e destinação de resíduos. A cidade apresentava abastecimento de água e coleta de esgoto a 97,02% e os demais itens, que são tratamento de esgoto, coleta de lixo e destinação adequada de resíduos sólidos, com índice de 100% do produzido, nesta mesma categoria encontra-se apenas 6% das 231 cidades analisadas (ABES, 2017).

A pesquisa de Ribeiro et al (2017) apresenta o detalhamento estratégico de algumas decisões que se tornaram destaque na conquista dos baixos índices de águas perdidas. As medidas que influenciaram na diminuição desses índices estão relacionadas ao mapeamento e monitoramento das zonas com maiores incidências de vazamentos e na inserção de válvulas redutoras de pressão nessas zonas e na inserção de formas de controle na medição de volume no processo de tratamento. Outras ações ainda são realizadas no sistema de abastecimento, tais como a restrição do uso de hidrantes, a troca sistemática de redes antigas e que apresentam grandes quantidades de vazamentos, renovação do parque de hidrômetros para que ocorra uma micromedição mais precisa, entre outras não menos

importantes, já que essas ações devem ser tomadas em conjunto para que, como observado, conquiste a redução nas perdas.

3. DISCUSSÕES

Com os relatos apresentados, pode-se destacar as situações mais representativas do sistema de abastecimento da cidade (Figura 7). Observa-se que as medidas mais impactantes sobrevieram de situações problemáticas em que, a rede de abastecimento e a população, enfrentavam. Primeiramente, com a falta completa de abastecimento, estiagem e posteriormente com a situação caótica em todos os ramos de saneamento. Porém, as decisões tomadas mostraram-se adequadas quanto a soluções imediata dos problemas e a gestão satisfatória com o passar dos anos.

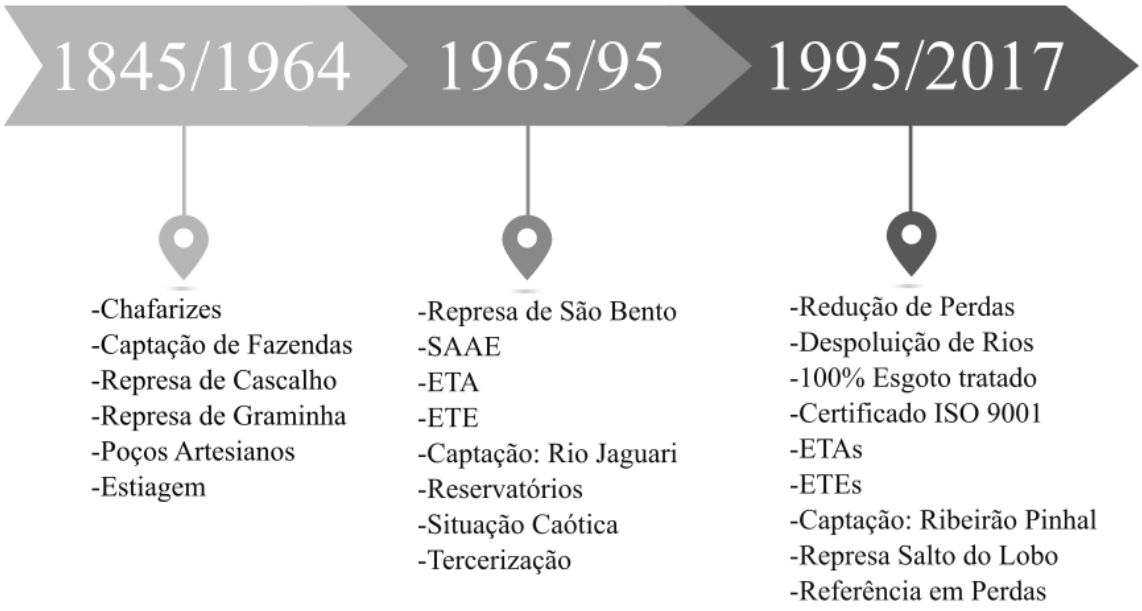


Figura 7. – Linha do Tempo

Deve-se considerar outros fatores que agem para que as situações problemáticas se intensifiquem, como o rápido crescimento populacional, urbanização desordenada, uso inadequado dos recursos hídricos e a disposição inapropriada de resíduos. O oposto dessas situações, são os cenários que influenciam de forma positiva a qualidade de gestão desses recursos e a conscientização da população.

3.1 Cenário Geográfico

A cidade é favorecida com a disposição de recursos hídricos na região, encontrando-se na Bacia do Rio Piracicaba, sendo cruzada pelo rio Jaguari e ribeirão Tatu, completamente canalizado. Está localiza também sobre aquífero Tubarão, porém a captação é dificultada pela grande profundidade em que se encontra. Esta disposição gera disponibilidade para escolha de pontos de represamento, captação e, também, outras alternativas que favorecem o abastecimento da cidade.

Outro fator importante, é o entroncamento de rodovias e ferrovias que ligam a cidade a outros estados e aos maiores centros populacionais e tecnológicos do país. Situando-se, ainda, próximo a hidrovia Tietê-Paraná, via onde ocorre importante ligação aos estados e países ao sul da região. Esse cenário possibilita o rápido e fácil acesso a equipamentos, tecnologias e pessoas, que de uma forma geral, influenciam no desenvolvimento da cidade.

3.2 Cenário Financeiro

A cidade conta, desde sua fundação, com grandes lavouras de café, cana-de-açúcar e frutas cítricas, sobrevindo a industrialização de produtos de madeira e couro. E, nas últimas décadas, o setor de joias folheadas tornou-se importante para a economia municipal, em que correspondendo a quase metade da produção brasileira (Thomaz, 2011). Esses fatores proporcionam arrecadação de recursos financeiros para o setor de saneamento, pois, a população e o município são beneficiados com a disponibilidade de empregos e a arrecadação oriundas das empresas, industrias e lavouras, diminuindo a inadimplência da população e criando alternativas para captação de recursos.

4 CONSIDERAÇÕES

Esse estudo vem nos provar que a eficácia de um sistema de abastecimento é alcançada pela realização eficiente dos processos, métodos e instalações realizados pelo órgão gestor. Mas, sem os setores industriais e a população envolvida e comprometida, os esforços tornam-se inúteis. Limeira encontrou maneiras assertivas no envolvimento da indústria, lavoura e população com o consumo consciente de seus recursos hídricos, vindo a dispor de gerações comprometidas e preocupadas com os mananciais da região.

A análise ainda mostra que o gerenciamento do sistema de abastecimento de água pode influenciar no desenvolvimento econômico, na degradação do meio ambiente e afetar o bem-estar da sociedade. Portanto, é necessário possuir o conhecimento pleno das características de uma rede, em que cada sistema tem suas características próprias, e priorizar alternativas de redução de perdas para o sistema em questão, ou seja, é preciso conhecer seu cadastro físico e operacional, em conjuntos com modelos econômicos, hidráulicos, ambientais e sociais, tendo tomadas de decisões mais acertadas, credibilidade juntos aos clientes e, assim, conseguir uma bem-sucedida redução na quantidade de águas perdidas, mesmo sabendo que todo sistema de distribuição acarreta em perdas em virtude de limites técnicos e econômicos.

REFERENCIAS

ABES (2017). Ranking ABES de Universalização do Saneamento. *Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental.*

Barroso, L. B., & Gastaldini, M. D. C. C. (2010). Redução de vazamentos em um setor de distribuição de água de Santa Maria-RS. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, *15*(2), 27-36.

Farley, M., & Trow, S. (2003). *Losses in water distribution networks*. IWA publishing.

Heflinger Jr, J. E. (Ed.). (2005). *Recordações de infância de Carlota Schmidt no Ibicaba*. *Editora Emporio Do Livro. (Vol. 1).*

Heflinger Júnior, J. E. (2007). Ibicaba o Berço da Imigração Européia de Cunho Particular**.** *Limeira: Editora Unigráfica. (Vol. 1).*

Hunaidi, O., Wang, A., Bracken, M., Gambino, T., & Fricke, C. (2004, May). Acoustic methods for locating leaks in municipal water pipe networks. In *International Conference on Water Demand Management* (pp. 1-14). Jordan: Dead Sea.

Hunaidi, O., Chu, W., Wang, A., & Guan, W. (2000). Detecting leaks in plastic pipes. *American Water Works Association. Journal*, *92*(2), 82.

Thomaz, J. C., Brito, E. P. Z., Marcondes, R. C., & Ferreira, F. C. M. (2011). Benefícios da aglomeração de firmas: evidências do arranjo produtivo de semijoias de Limeira. *Revista de Administração*, *46*(2), 191-206.

REPE (2017). Historical reports, pamphlets, letters, documents and periodicals.

Ribeiro, L. C. L. J, Andrade, J. G. P., Zambon A. G., (2017). Gestão de sistema de abastecimento de água através de ações para redução de perdas. *Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais. Volume 8, n.2,*

PMRH. (2016-2020). Prefeitura Municipal de Limeira. Secretaria do Desenvolvimento Rural e Meio Ambiente. *Plano Municipal de Recursos Hídricos*. Limeira: SMDR

Pal, M., Dixon, N., & Flint, J. (2010). Detecting & locating leaks in water distribution polyethylene pipes. In *Proceedings of the world congress on engineering* (Vol. 2).
Wu, Z. Y., & Sage, P. (2008). Water loss detection via genetic algorithm optimization-based model calibration. In *Water Distribution Systems Analysis Symposium* (pp. 1-11).
Zambon, A. G., Andrade, J. G. P., Ribeiro, L. C. L. J. (2015). Redução de perdas físicas no Sistema de distribuição de água. *In: XIV SEREA – Seminário IberoAmericano de Redes de Agua y Drenaje, Guanajuaro, México*

IAHR **AIIH**

XXVIII CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA
BUENOS AIRES, ARGENTINA, SEPTIEMBRE DE 2018

LEVANTAMENTO DO PERFIL DE CONSUMO DE ÁGUA POR TIPO DE ESTABELECIMENTO COMERCIAL

[1]Claudia Monteiro Carrillo, [2]Natália Calcina , [3]André F. de Angelis, [4] Daniel Bezerra Barros, [5] Lubienska Cristina Lucas Jaquiê Ribeiro

[1]Universidade de Campinas, Brasil, claudinha.carrillo@hotmail.com
[2]Universidade de Campinas, Brasil, natalia.calccina@gmail.com
[3] Universidade de Campinas, Brasil, andre@ ft.unicamp.br
[4]Universidade de Campinas, Brasil, danielbezerrab@gmail.com
[5]Universidade de Campinas, Brasil, lubi@ft.unicamp.br

RESUMO

O aumento da população gera uma consequentemente elevação do consumo de água. Por exemplo, no Brasil, enquanto a população triplicou no último século, o gasto hídrico sextuplicou. A previsão do consumo é um dos temas mais influentes no planejamento e gerenciamento de um sistema de abastecimento. O objetivo desta pesquisa foi a caracterização do perfil dos consumos doméstico, comercial, industrial e público, com vistas a compreender e subsidiar o gerenciamento de um sistema de abastecimento de água, tendo a cidade de Limeira/SP como objeto de estudo. A metodologia utilizada foi a análise dos dados fornecidos pela concessionária local, complementados quando possível por informações da Prefeitura Municipal. Em função das inconsistências sistemáticas dos dados obtidos, realizou-se o levantamento do perfil de consumo somente em pontos comerciais. Observou-se uma variação de volume ao longo dos anos, intensificada pela individualidade de cada estabelecimento, concluindo-se pela necessidade de levantamentos detalhados por categorias e subcategorias para que a gestão, planejamento e controle sejam adequadas.

ABSTRACT

The increase of the population generates a consequently increase of the consumption of water. For example, in Brazil, while population has tripled in the last century, water expenditure has increased sixfold. Consumption forecasting is one of the most influential topics in planning and managing a supply system. The objective of this research was to characterize the profile of domestic, commercial, industrial, and public consumption, aiming to understand and support the management of a water supply system. The city of Limeira / SP was the object of study. The methodology used was the analysis of the data provided by the local concessionaire, complemented where possible by information from the City Hall. Due to the systematic inconsistencies of the obtained data, a survey of the consumption profile was carried out only at commercial points. A variation of volume was observed over the years, intensified by the individuality of each establishment, concluding for the need of detailed surveys by categories and subcategories for management, planning and control to be adequate.

PALAVRAS CHAVES: *Consumo, Água, Uso Racional, Sustentabilidade.*

INTRODUÇÃO

É fato que a população vem aumentando ano a ano (IBGE, 2017) e, por consequência, o volume de consumo de água acompanha este crescimento. O aumento em relação a população e a demanda mundial de água tendem a agravar os problemas com os corpos hídricos existentes. Victorino (2006) relata que no século XX, a população triplicou no Brasil enquanto o consumo sextuplicou. Portanto, utilizar os recursos hídricos de maneira sustentável é uma necessidade atual. No entanto, institutos de pesquisas mundiais alertam que os mananciais do planeta estão se esgotando pelos desperdícios, pela poluição, pela degradação e pelo consumo excessivo (Tsutiya, 2006).

Os interesses em comum pela água são tendências para o futuro, que poderão gerar uma série de conflitos. Então, dentro deste cenário, questões até então irrelevantes como o uso racional da água por seus respectivos consumidores, o tratamento antes e após ser consumida, entre outros, envolveram grandes mudanças nos hábitos e culturas, nas leis e nas tecnologias, afim de se adaptarem às novas realidades disponíveis.

Para o planejamento e gerenciamento do sistema de abastecimento de água, a previsão do consumo de água é um dos fatores principais. A operação dos sistemas e suas aplicações e/ou melhorias estão diretamente associados à demanda de água. O dimensionamento das tubulações, estruturas e equipamentos são feitos em função das vazões de água, que por sua vez, dependem do consumo médio por habitante, da estimativa do número de habitantes, das variações de demanda, e de outros consumos que podem ocorrer na área em estudo (Tsutiya, 2006).

Heller (2010) apresenta uma classificação quanto aos consumidores de água, baseada em categorias facilmente identificáveis e com o propósito de estabelecer políticas e cobranças diferenciadas.

- Água para uso doméstico: corresponde a utilização residencial, tanto em área interna como externa;
- Água para uso comercial: abrange de pequenos a grandes consumidores, como padarias, hospitais, postos de gasolina, clubes, hotéis, shoppings centers, entre outros;
- Água para uso industrial: abrange o uso humano, doméstico, incorporação ao produto, utilização no processo de produção e perdas ou usos não rotineiros;
- Água para uso público: corresponde a utilização em locais públicos, como jardins e parques, combate a incêndio, limpeza, entre outros.

Compreender as questões ambientais ajuda no processo de conscientização daqueles envolvidos, afim de buscar uma melhor forma de distribuição e a sustentabilidade do uso dos recursos hídricos, de forma consciente e racional, contribuindo então para o avanço do conhecimento científico e das diversas relações sociais, econômicas e ecológicas. É muito importante que atitudes sejam tomadas, através de atividades de pesquisa e programas para frear os possíveis impactos negativos gerados nos rios pelo uso inadequado.

Percebe-se, então, que apenas investir na oferta de água, buscando, por exemplo, fontes de abastecimento cada vez mais distantes para atender a demanda crescente desse insumo não será suficiente para suprir o déficit de abastecimento e da coleta e transporte do esgoto gerado (Dias (2010), Silva (2006), Ywashima et al. (2006)).

Embora o Brasil seja um país com bastante disponibilidade hídrica em rios, o uso inadequado e a poluição comprometem esse recurso em várias regiões do país (Oliveira et al, 2012). No caso, a concentração de água doce disponível para o consumo pouco coincide com a concentração populacional. A região Norte acumula grande parte da água no país. Porém, é a região onde a demanda está entre as menores. Já no Estado de São Paulo, existe a situação contrária, há grande demanda da água e pouca disponibilidade. Esse é um dos motivos causadores da crise de

água em São Paulo que ocorreu nos últimos anos, e por isso, é importante avaliar os diferentes perfis de consumo de água.

Apesar de todos os problemas que são causados por falta de água, como as secas que levam a provocar apagões e o racionamento de energia, o consumidor brasileiro ainda não têm plena consciência da importância do uso racional da água. Deve-se observar a situação atual do país em termos de consumo por categorias para entendimento e gerenciamento dos sistemas, verificando as necessidades de estabelecimento de políticas tarifárias e de cobrança diferenciada.

Na busca do valor de demanda para implantação ou, mais usualmente, ampliação dos sistemas de abastecimento de água visando elevar a fração da população abastecida, torna-se crucial uma estimativa acurada do consumo.

O assunto "consumo" é complexo, pois existem diversos fatores que podem influenciar, como variáveis climáticas e sociais. As climáticas podem ser temperatura, umidade relativa do ar, velocidade do vento e precipitação. A sociais podem ser os hábitos e nível de vida da população como dia da semana, mês do ano, ocorrência de feriados, dia do mês, hora do dia e estação do ano, assim como a natureza e tamanho da cidade, existência ou ausência de medição e variação de cobranças, o nível de pressão na rede, entre outros (Ambroasio, 2017).

Poucas foram as pesquisas realizadas para a determinação de consumo de água, principalmente quando se trata de Brasil, relacionados a qualquer uma das categorias de consumidores. Em sua grande maioria, as literaturas que apresentam as tabelas desses consumos são de trabalhos realizados em outros países, e os poucos realizados no Brasil datam de anos (Tsutiya (2006), Azevedo Netto et al (1998), Dacach (1979), Yassuda (1976)). Diante deste cenário, realizar pesquisas que evidenciem os reais consumos de água de cada categoria é algo que deve ser realizado com urgência para garantir um bom planejamento e gerenciamento dos sistemas de abastecimento de água brasileiros.

Assim, acredita-se que o levantamento do consumo atual por categoria é uma das alternativas para entender e gerenciar os sistemas de abastecimento de água. Portanto, apresentar um levantamento do perfil de consumo de água por tipo de estabelecimento comercial, visto que a previsão do consumo de água é um dos fatores de fundamental importância para a gestão hídrica é o foco dessa pesquisa, que realizou a caracterização do perfil de consumo de água de alguns estabelecimentos comerciais no município de Limeira, através do levantamento das inscrições cadastrais, endereço e consumo das ligações comerciais junto a empresa responsável pela concessão do abastecimento de água na cidade no ano de 2016, a Odebrecht Ambiental.

MATERIAIS E MÉTODOS

Ao longo do trabalho, foram realizadas algumas caracterizações do consumo na cidade de Limeira, que apresenta segundo o SNIS – Sistema Nacional de Informações sobre o Saneamento, no Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos de 2016, um índice de perdas na distribuição de 15,57%, um dos melhores no país, considerando-se a cidade um bom estudo de caso para esta pesquisa.

No município de Limeira, a empresa responsável pelo abastecimento de água em 2016 era a Odebrecht Ambiental, e a fiscalização do abastecimento e a coleta de esgoto são realizadas por meio do SAAE, órgão responsável por estudar, projetar e executar obras relativas à construção dos sistemas públicos de drenagem de águas pluviais em todo o município (SAAE LIMEIRA, 2017).

Foram levantados os dados sobre o consumo dos últimos cinco anos de algumas categorias de perfil comercial, e então a partir de uma análise estatística para o tratamento dos dados (quando necessário ponderação e médias) e de comparação, chegou-se a uma conclusão sobre o uso da água na atualidade. Para isso foi utilizado um software especificamente desenvolvido para este propósito para inserir e filtrar os dados por tipo de consumo comercial.

O desenvolvimento de ferramentas para sanar a dificuldade na manipulação e análise de dados se mostra cada vez mais útil em diversos segmentos. Essas ferramentas permitem a criação de

gráficos, visualizações de planilhas e bases de dados, a fim de analisar grandes quantidades de informações quase em tempo real (L'ASTORINA, 2015).

Então, foi criado um banco de dados utilizando o SGBD SQL Server para o armazenamento das bases que se encontravam em planilhas do Excel. As tabelas do banco foram criadas após os tratamentos nas planilhas e de acordo com a harmonização de seus campos. Por fim foi desenvolvida a ferramenta que permite ao usuário que consulte essas bases, e retorne as informações já pré-definidas para realização da caracterização de perfis de consumo através da interface, pela linguagem de programação Java e a IDE Netbeans. A ferramenta dá suporte à importação de bases de dados e à geração de gráficos e permite que sejam realizadas análises (Figura 1).

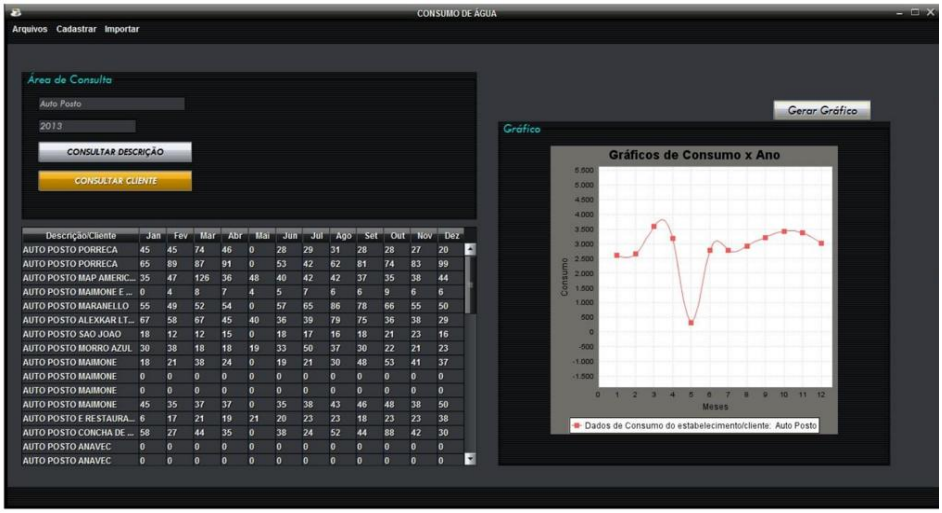


Figura 1. Representação de uma consulta por cliente.

As buscas na ferramenta podem ser realizadas na Consulta por Descrição ou na Consulta por Cliente, resultando em estabelecimentos para análise de consumo. Quanto maior o volume de dados inseridos na ferramenta melhores são os resultados. As buscas são feitas por interface que retorna os valores em uma tabela e permite a geração do gráfico referente ao consumo.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Foi realizado levantamento dos dados dos últimos cinco anos (de 2010 a 2015) do consumo de água de alguns consumidores comerciais do município de Limeira junto a Empresa Odebrecht Ambiental. É importante citar que não houve uniformidade das informações obtidas, como no caso das planilhas de consumo de água que variam de ano a ano. Por exemplo, alguns consumidores possuem nomes e inscrições diferentes ao longo do tempo, ou a disposição das informações difere, há colunas presentes em somente alguns anos, etc. Para a resolução do problema, foram utilizadas informações de tipos de comércio via Lista Telefônica da cidade. Foram traçadas as curvas mensais médias que de consumo para fundamentar uma discussão desse comportamento.

Com o auxílio do software para inserção e separação dos tipos de perfis de consumo comercial, foram realizadas algumas caracterizações como em farmácias, mercados, igrejas, unidades de saúde e postos de gasolina que são exemplificados neste trabalho. A metodologia foi baseada em análise estatística mais adequada para o tratamento dos dados, como ponderação e média aritmética e de comparação, para chegar a uma conclusão de como está o uso de água na atualidade.

Tabela 1. Dados obtidos para farmácias.

Ano	Média Consumo anual total	Quantidade farmácias	Média por unidade/mês

	[m³]	[UN]	[m³]
2011	177	16	15
2012	213	21	18
2013	282	20	23

Analisando as farmácias de Limeira no período de 2011 a 2013, conforme ilustrado pela Tabela 1 e Figura 2, observa-se uma similaridade nos picos de consumo nas mesmas épocas do ano e um aumento nas médias dos consumos anuais, primeiramente em torno de 20% e em seguida de 32%. Acredita-se que houve esse aumento em função do possível crescimento desse tipo de estabelecimento, elevando a demanda de funcionários, já que não houve aumento significante no número de farmácias analisadas.

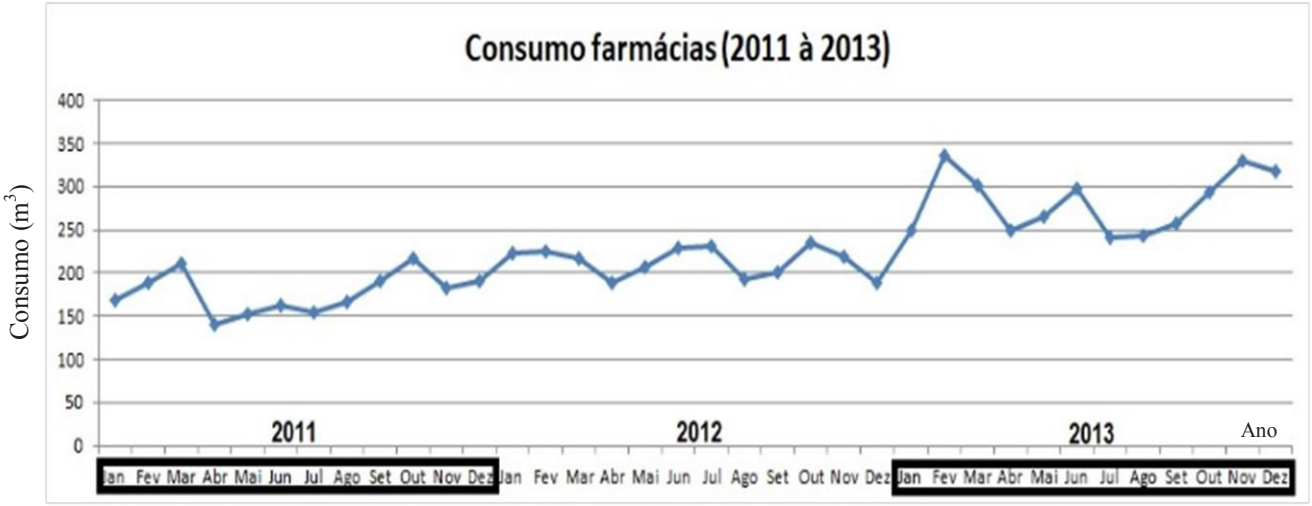


Figura 2.- Consumo de farmácias de Limeira de 2011 a 2013.

A principal atividade de postos de gasolina é a venda de combustíveis. Entretanto, quanto ao consumo de água, a atividade de lavagem de carros é o fator determinante, seguido pelo uso de banheiros pelos funcionários. Assim, quanto aos dados de consumo de postos de gasolina na cidade de Limeira, Tabela 2 e Figura 3, os anos de 2011 e 2012 já não obedecem a mesma faixa média obtida pelos dados da Sabesp de 2000 (aproximadamente 48m³) (Tsutiya, 2006) no ano de 2011 chegando a dobrar seu valor porém nos anos de 2013, 2014 e 2015 a média de consumo mensal aumentou para aproximadamente 177 m³.

Tabela 2. Dados obtidos para postos de gasolina

Ano	**Média Consumo anual total** [m³]	**Quantidade postos de gasolina** [UN]	**Média por unidade/mês** [m³]
2011	1139	22	95
2012	733	16	61
2013	2074	17	173
2014	2216	21	185
2015	2093	21	174

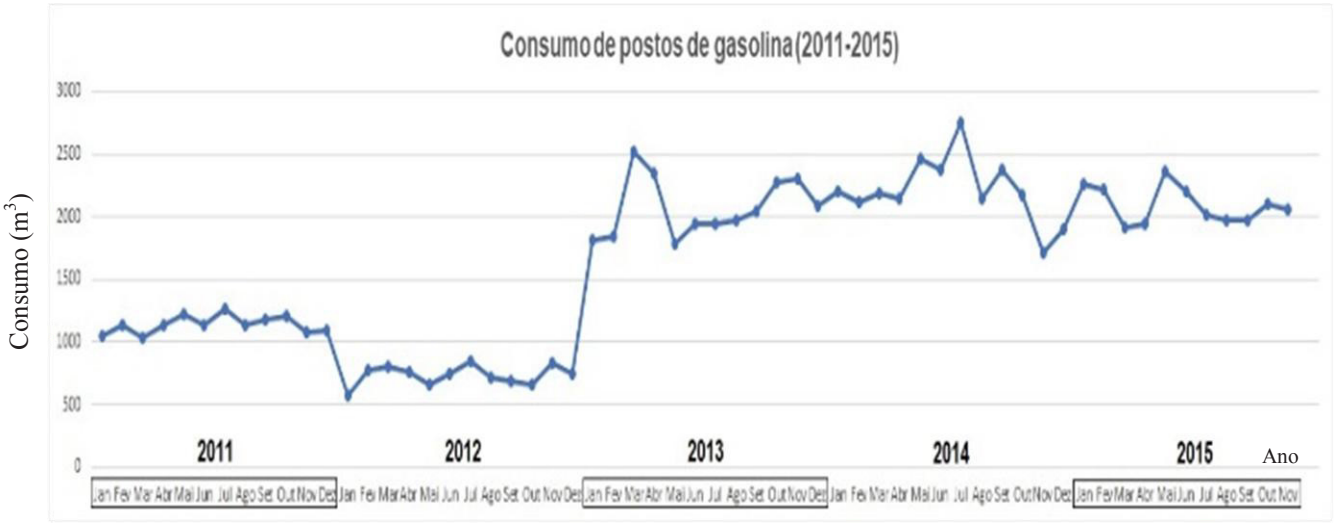


Figura 3.- Consumo de postos de gasolina de 2011 a 2015.

Pela crise hídrica ocorrida em 2014, principalmente no estado de São Paulo, era esperado que o volume fosse reduzido, e não dobrado, como foi verificado. Entretanto, consultando a população da cidade, pode-se verificar que aumentou o serviço de lavagem de carros pelos postos nesse período em virtude de regras estabelecidas pelo município, que multariam as pessoas que estivessem lavando seus carros em casa.

Para o caso do consumo de igrejas na cidade, foi realizado um levantamento de 2011 até 2015, Tabela 3 e Figura 4. Pode ser notado que a partir do fim de 2014 foi reduzido o consumo de água, provavelmente por reflexo da crise hídrica no estado de SP, com a maior conscientização e economia da população que frequenta esses locais.

Tabela 3. Dados obtidos para igrejas

Ano	Média Consumo anual total [m³]	Quantidade igrejas [UN]	Média por unidade/mês [m³]
2011	3136	214	261
2012	3892	237	324
2013	3462	242	288
2014	3098	211	258
2015	2655	211	221

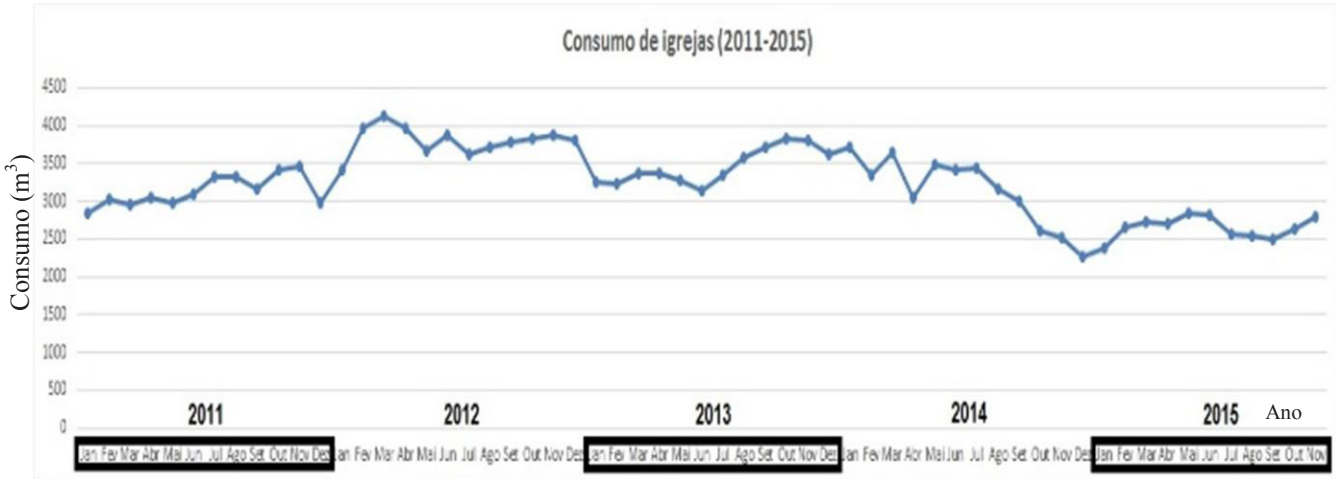


Figura 4.- Consumo de igrejas de 2011 a 2015.

Sobre as unidades de saúde da cidade de Limeira, Tabela 4 e Figura 5, foi englobado postos de saúde, clínicas e laboratórios. A média anual de todas as unidades foi de 349 m³ e permaneceu com poucas variações ao longo dos 3 anos analisados, apenas sendo notada uma redução na média consumida por cada unidade ao longo do ano de 2013. Não há dados de outras referências sobre esse perfil para uma eventual comparação.

Tabela 4. Dados obtidos para unidades de saúde

Ano	Média Consumo anual total [m³]	Quantidade unidades de saúde [UN]	Média por unidade/mês [m³]
2011	358	18	30
2012	374	18	31
2013	315	21	26

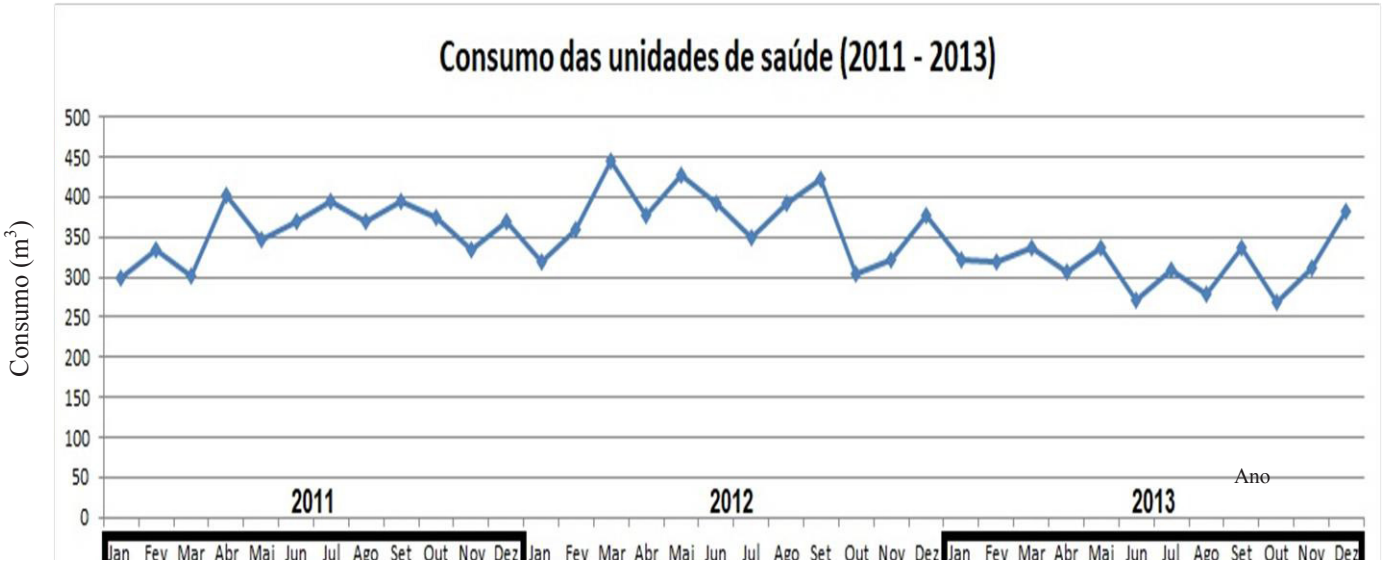


Figura 5.- Consumo de unidades de saúde de 2011 a 2015.

No caso do perfil de consumo de água de mercados, há uma variação muito grande ao longo dos anos, tanto para o intervalo de mercados selecionados de 2012 a 2013 (Figura 6 e Tabela 5) como os selecionados de 2014 a 2015 (Figura 7 e Tabela 6).

Tabela 5. Dados obtidos para mercados

Ano	Média Consumo anual total [m³]	Quantidade mercados [UN]	Média por unidade/mês [m³]
2012	3.107	8	259
2013	1.254	8	105

Figura 6.- Consumo de mercados entre 2012 e 2013.

A média da soma dos 8 estabelecimentos obtida para o primeiro caso foi de 2180 m³ por ano. Já na Figura 7, a média entre a soma de 7 estabelecimentos foi de 364 m³ por ano, representando uma queda brusca no consumo, que não poderia ser associada apenas a um mercado a menos. Supõe-se que após a crise hídrica de 2014 houve uma grande redução em todos os locais. Segundo a literatura (Tsutiya, 2006), o consumo de água em mercados é de 0,05 m³/dia em m² de área, ou seja, por mês isso representaria 1,5 m³ a cada m² de área e se calcular esse valor pela média mensal obtida de 2014/2015 estima-se a área do mercado em 20 m², que seria um estabelecimento de pequeno porte.

Tabela 6. Dados obtidos para mercados

Ano	Média Consumo anual total [m³]	Quantidade mercados [UN]	Média por unidade/mês [m³]
2014	415	7	35
2015	308	7	26

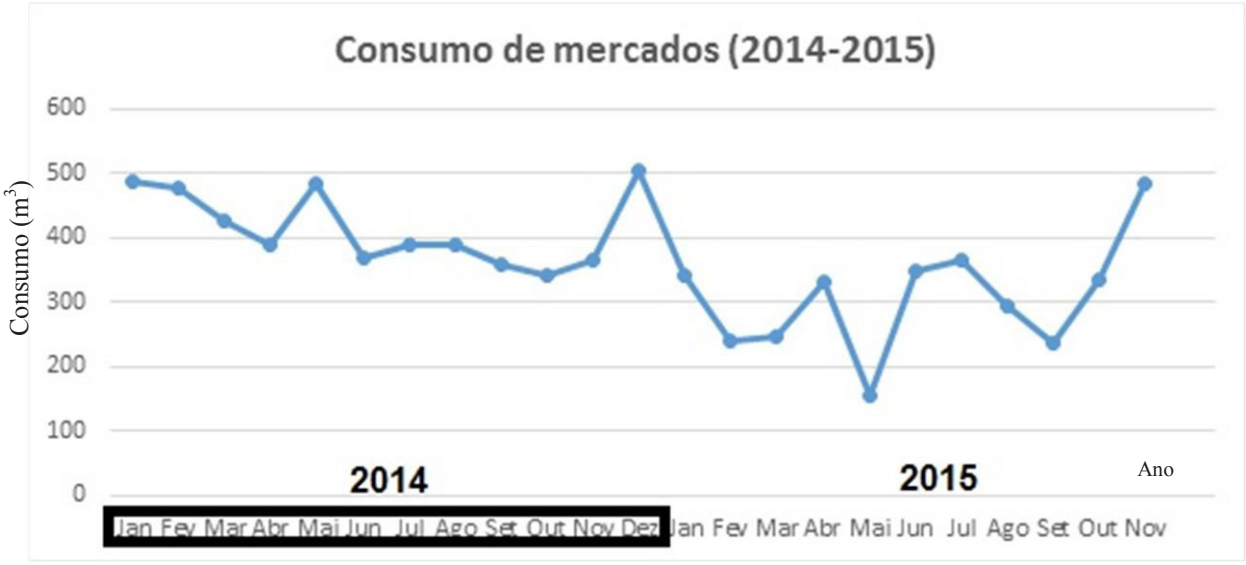


Figura 7.- Consumo de mercados de Limeira entre 2014 e 2015.

Observaram-se mudanças no consumo ao longo do tempo, independentemente do tipo de estabelecimento, o que dificulta a gestão das redes de abastecimento de água. Há alguma probabilidade de que este mesmo comportamento se repita em outras categorias de consumo, atrelado às mudanças de sociais, culturais e econômicas da população. Trabalhos como o presente

podem auxiliar no desenvolvimento das chamadas cidades inteligentes por precisar melhor as demandas de água em suas diversas categorias.

CONCLUSÃO

Neste trabalho, cujo objetivo inicial era descrever os diferentes padrões de consumo de água, foram investigados alguns perfis de consumo em subcategorias dos estabelecimentos comerciais da cidade de Limeira, com base em dados fornecidos pela concessionária e pela administração municipal. Houve uma grande dificuldade em realizar um estudo abrangente, dadas as inconsistências das planilhas recebidas e a falta de classificação dos consumidores naquelas bases. Foi necessário complementá-las com informações manualmente extraídas de catálogos telefônicos da localidade, um processo que limitou o alcance da pesquisa. Foi modelada e implementada uma base de dados relacional usando o MS SQL Server e foi desenvolvido um software cliente para carga, consulta e geração de gráficos em linguagem Java. Com estes recursos, foram analisadas as subcategorias farmácias, postos de gasolinas, igrejas, unidades de saúde e mercados.

Cada subcategoria apresentou um comportamento próprio, mas a regra geral foi a variação do padrão de consumo ao longo do tempo. Foram feitas especulações a respeito das causas das mudanças ou das constantes encontradas, sem que houvesse evidências mais concretas nas quais a pesquisa pudesse se apoiar. Os resultados aqui obtidos não autorizam extrapolação imediata para outros cenários ou épocas, ainda mais porque coincidiram com uma condição hídrica atípica na região.

Ficou patente a necessidade de mais trabalhos como este, com maiores abrangências temporais e espaciais, a bem da melhoria do planejamento e gerenciamento do abastecimento de água. No entanto, também ficou claro que a metodologia utilizada sofreu severas limitações em função das inconsistências dos dados disponíveis e falta de integração entre órgãos públicos e prestadores de serviço. Portanto, além do desenvolvimento de novas e mais eficazes metodologias, este trabalho indica fortemente a necessidade de formulação e implementação de políticas públicas de harmonização, integração e disponibilização de dados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ambrosio, J. K., Santos, C. L. R., Brentan, B. M., Ribeiro, L. C. L. J., Luvizotto Jr., E. (2017). "Correlational analysis of weather and social variables in real-time demand forecasting". XV Seminário Iberoamericano de Redes de Agua y Drenaje, SEREA.

Azevedo netto, J. M.; Fernandez, M. F. Y.; Araujo, R.; Ito, A.E. Manual de hidráulica. 8 ed. São Paulo: Ed. Edgard Blücher, 669p, 1998.

Brentan, B. M; Luvizotto JR. E., Ribeiro, L. C. L. J. (2013). "PSO applied to reduce the cost of energy in water supply networks". Applied Mechanics and Materials, v 409-410, p. 703-706.

DACACH, N.G. Saneamento básico. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora, 314p, 1979.

Dias, D. M.; Martinez, C. B.; Libânio, M. (2010). "Avaliação do impacto da variação da renda no consumo domiciliar de agua". Revista Engenharia Sanitária Ambiental. v.15 n.2 | 155-166.

Heller, L.; Pádua, V. L. (2010). **"**Abastecimento de água para consumo humano". 2. ed. rev. e atual .- Belo Horizonte : Editora UFMG. 2 v.: il. - (Ingenium).

IBGE (2017) Projeção da população do Brasil e das Unidades da Federação. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/apps/populacao/projecao/>. Acesso em 29 de maio de 2017.

L'ASTORINA, E.. Big Data Visualization: Review of the 20 Best Tools. Disponível em: < http://inspire.blufra.me/big-data-visualization-review-of-the-20-best-tools/>. Acesso em 28 de maio de 2017.

Oliveira, I. C.; Cardoso, L.; Paula, H. M.; Castro, H. V. (2012). "Educação ambiental escolar com foco no uso racional da água: diagnóstico e intervenção".

Silva, G. S.; Tamaki, H. O.; Gonçalves, O. M. (2006). "Implementação de programas de uso racional da água em campi universitarios". Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 6, n.1, p. 49-61.

Tsutiya, M.T. (2006). *Abastecimento de água*. 3ª ed. São Paulo: Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Cap 3.

Victorino, C. J. A. (2007). Planeta água morrendo de sede: uma visão analítica na metodologia do uso e abuso dos recursos hídricos. 1. ed. Porto Alegre: EDIPUCRS.

Ywashima, L. A.; Ilha, M. S. O.; Craveiro, S. G.; Gonçalves, O. M. (2006). "Método para avaliação da percepção dos usuários para o uso racional da água em escolas".

Yassuda, E. R.; Nogami, P. S.; Pereira, B. E. B.; Martins, J. A. Técnica de abastecimento e tratamento de água. Vol. 1. Abastecimento de água. 2 ed. São Paulo: CETESB, págs.:107-134, 1976.

IAHR **AIIH**

XXVIII CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA
BUENOS AIRES, ARGENTINA, SEPTIEMBRE DE 2018

MICROTURBINAS HIDRÁULICAS. DISEÑO, ADAPTACIONES PARA ENSEÑANZA DE MICROGENERACIÓN

Teresa Reyna, María Lábaque, Belén Irazusta, Santiago Reyna y Cesar Riha
Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Universidad Nacional de Córdoba, Argentina,
teresamaria.reyna@gmail.com, belen.irazusta@gmail.com

RESUMEN:

A la hora de mejorar el proceso de enseñanza-aprendizaje a nivel universitario, se buscan implementar técnicas modernas. Este proyecto busca generar conciencia entre los estudiantes para el cuidado del medio ambiente y fomentar el desarrollo de las energías renovables, focalizando el estudio en las micro centrales hidroeléctricas. En la Universidad Nacional de Córdoba con subsidios de la Secretaría de Ciencia y Tecnología (SECyT) se han desarrollado tres proyectos destinados a diseñar y construir micro turbinas con el objeto de establecer la factibilidad de construcción y desarrollo con tecnología local. La primera turbina desarrollada fue una Michael Banki, posteriormente se desarrolló una axial y por último una máquina Turgo. Las mismas fueron diseñadas por alumnos y docentes de la UNC y construidas una en un taller local, y otra en el colegio secundario Instituto Técnico Cristo Obrero de Carlos Paz. También se materializaron mediante impresoras 3D generando un prototipo de la turbina axial apto para llevar a las aulas.

ABSTRACT:

When it comes to improving the teaching-learning process at the university level, modern teaching techniques are sought to be implemented. This project seeks to generate awareness among students for environment care and encourage the development of renewable energies, focusing the study on micro hydroelectric plants. In the National University of Córdoba (UNC), three projects have been developed to design micro turbines in order to establish the feasibility of construction and development with local technology. A Michael Banki turbine, another axial turbine and finally a Turgo were developed. They were designed by students and teachers of the UNC and built in local laboratories, one in the secondary school Technological Institute Cristo Obrero of Carlos Paz and another was materialized by 3D printers generating a prototype of the turbine suitable to take to classrooms.

PALABRAS CLAVES: microturbinas; enseñanza; microgeneración;

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el desarrollo de las energías renovables es la consecuencia previsible de una mirada al tema energético desde la perspectiva de la sustentabilidad. Dentro de este paradigma, los investigadores y los responsables de energía y medioambiente tienen un papel fundamental generando su difusión y acercando la tecnología a la población.

Las sociedades modernas, que sustentan su crecimiento en un sistema energético basado principalmente en la obtención de energía a través de combustibles fósiles, se inclinan cada vez más hacia la adopción de medidas que protejan nuestro planeta. Así lo reflejan las actuales políticas nacionales y los acuerdos y tratados internacionales que incluyen como objetivo prioritario un desarrollo sostenible que no comprometa los recursos naturales de las futuras generaciones (CISL, 2017).

La promoción de las tecnologías de energías renovables ofrece una doble ventaja: diversificación energética y la esperanza de desarrollo para muchas comunidades pobres y aisladas que no están conectadas a las grillas de transporte y distribución eléctrica. El suministro de energía a las comunidades aisladas se concibe como soporte a las actividades productivas, domésticas y comerciales de éstas. En consecuencia, es considerado como un componente estratégico dentro de un marco de trabajo para el desarrollo (Reyna, y otros, 2012).

Conociendo la problemática actual, este proyecto busca generar conciencia entre los estudiantes para el cuidado del medio ambiente y fomentar el desarrollo de las energías renovables. Desde la hidráulica, se focalizó el estudio en la profundización y consolidación del conocimiento sobre las turbomáquinas, en especial aquellas utilizadas en las micro centrales hidroeléctricas.

En este contexto, se han desarrollado en la Universidad Nacional de Córdoba tres proyectos destinados a diseñar micro turbinas con el objeto de establecer la factibilidad de construcción y desarrollo con tecnología local.

Durante el año 2010-2012 se trabajó en el desarrollo de una turbina Michael Banki, la cual se diseñó y se construyó completamente en talleres de Córdoba en escala 1:1. Esta máquina se encuentra actualmente instalada en el Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba.

Durante el período 2014-2015 se trabajó en un segundo proyecto que también contó con financiamiento de la Secretaría de Ciencia y Tecnología de la Universidad Nacional de Córdoba (SECYT), donde se desarrolló la ingeniería de una turbina hélice (tipo Kaplan). Actualmente se está trabajando con el colegio secundario Instituto Técnico Cristo Obrero de Carlos Paz en la construcción de dicha turbina de manera de incorporar el tema en el nivel educativo medio. Además, se ha firmado un acta acuerdo entre la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de colaboración con dicho colegio para continuar trabajando en forma conjunta.

Como siguiente paso hacia la difusión de estas turbinas se desarrolló una turbina tipo Turgo (período 2016-2017) y se materializó la misma mediante impresoras 3D generando un prototipo de la turbina apto para llevar a las aulas de clases.

METODOLOGÍA

El proyecto consistió en el diseño, modelación y materialización de pequeñas turbinas (microturbinas) para luego utilizarlas en el ámbito de enseñanza y mostrar con claridad el funcionamiento de dichas máquinas.

En primer lugar, se definieron los parámetros necesarios para el diseño de la turbomáquina (máquinas utilizables en la Provincia de Córdoba), luego se desarrolló la memoria de cálculo y se la dibujó en el programa SolidWorks. Finalmente se materializaron las mismas ya sea siendo fabricadas en el colegio secundario Instituto Técnico Cristo Obrero o en una impresora 3D.

Con las máquinas y diferentes animaciones, se traslada este proyecto a las aulas para visualizar de mejor manera el funcionamiento de las turbomáquinas.

DESARROLLO

El análisis teórico de las turbomáquinas se realiza suponiendo despreciable el efecto de la pérdida de carga por fricción y considerando un fluido incompresible. Luego, se descompone la velocidad del fluido de manera que la velocidad u_1 es la velocidad absoluta del álabe a la entrada o a la salida, c_i, la absoluta del fluido, w_i, la velocidad relativa del fluido con respecto al álabe, c_{im}, la componente meridional de la velocidad absoluta del fluido, c_{iu}, la componente periférica de la velocidad absoluta del fluido, α_i, el ángulo que forman las dos velocidades c_i y u_i y β_i el ángulo que forma w_i con $-u_i$. Estas tres velocidades c_1, u_1 y w_1 están relacionadas según la mecánica del movimiento relativo según la ecuación 1:

$$\overline{w_1} = \overline{c_1} - \overline{u_1} \quad [1]$$

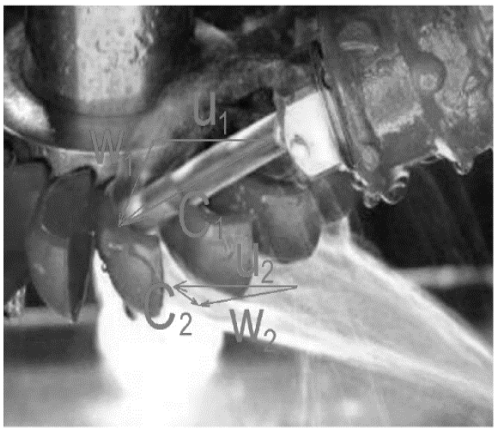


Figura 1.- Triángulo de velocidades.

Dada la Segunda forma de la ecuación de Euler (ec. 2)

$$H_u = \frac{{u_1}^2 - {u_2}^2}{2g} + \frac{{w_2}^2 - {w_1}^2}{2g} + \frac{{c_1}^2 - {c_2}^2}{2g} \quad [2]$$

La altura dinámica que da el fluido al rodete es el tercer término de la ecuación anterior, es decir $\pm\frac{{c_1}^2 - {c_2}^2}{2g}$, mientras que, $\frac{{u_1}^2 - {u_2}^2}{2g} + \frac{{w_2}^2 - {w_1}^2}{2g}$ es la altura de presión o estática del rodete.

El término $\frac{{u_1}^2 - {u_2}^2}{2g}$ constituye la carga estática debida a la acción centrífuga o reacción inercial del fluido producido por la aceleración normal creada con el arrastre del fluido por los álabes en su rotación alrededor del eje de la máquina (Polo Encinas, 1976).

El grado de reacción de una turbina se refiere al modo como trabaja el rodete y es la relación entre la energía de presión H_p y la energía total H_u, definido según la ecuación:

$$GR = \frac{H_p}{H_u} = \frac{altura\ de\ presión\ absorbida\ por\ el\ rodete}{altura\ total\ absorbida\ por\ el\ rodete} \quad [3]$$

Si el grado de reacción es 0, es decir $H_p = 0$, la máquina se llama de acción o de impulso. Si $GR > 0$, la turbina es de reacción al tener una componente de presión en su energía.

Así, según la clasificación dadas cada una de las turbinas, las turbinas Turgo y las de flujo cruzado tendrán un $GR = 0$, mientras que las turbinas Francis y Kaplan tendrán un $GR > 0$.

Según las características estimadas de salto y caudal y de la potencia que se necesite, es posible, identificar la tipología de la turbina y el tamaño más adecuado.

Los sistemas mini-hidráulicos pueden utilizarse en todos los casos en los que haga falta un suministro de energía y esté disponible un curso de agua, aunque sea pequeño, con un salto incluso de pocos metros. En esos casos, la introducción de sistemas de utilización de las aguas tiene un impacto reducido ya que no se modifica el uso mayoritario del curso de agua, que puede ser vital para el suministro de zonas aisladas.

Requieren de pocos componentes: Grupo turbina – generador –y un Sistema regulador. Puede utilizarse para alimentar baterías. No es necesaria la presencia de una persona continuamente, sino de un operador que de manera periódica controle el correcto funcionamiento de las instalaciones hidráulicas (de toma) y de las electromecánicas (turbina-alternador).

Tabla 1.- Clasificación de las centrales hidroeléctricas según su potencia.

Región	Institución	Micro Central	Mini Central	Pequeña Central
Mundial	ONUDI[1]	< 100 kW	101-2000 kW	2000-10000 kW
Latinoamérica	OLADE[2]	< 50 kW	51-500 kW	500-5000 kW

1 Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial. 2 Organización Latinoamericana de Energía.

En el caso de micro-sistemas existen diferentes máquinas que se adecúan a las condiciones del lugar o a las posibilidades que existan para su instalación. Las diferencias entre las máquinas vienen vinculadas al mejor aprovechamiento que se le puede dar al potencial energético del agua para generar energía eléctrica. Cada tipo de turbina solo puede trabajar con caudales comprendidos entre el nominal (para el que el rendimiento es máximo) y el mínimo técnico por debajo del cual no es estable (Mataix, 2009).

La elección de un tipo de turbinas dependerá de las características estimadas de salto y caudal de la zona de emplazamiento y de la potencia que se necesite. En la Figura 2 se muestra un diagrama que presenta las regiones recomendables para los diferentes tipos de turbinas hidráulicas en función de estas características físicas de los cursos de agua.

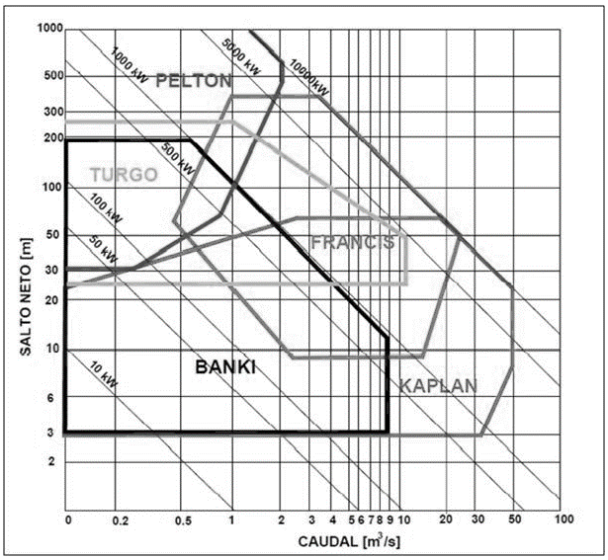


Figura 2.- Rango de aplicación de distintos tipos de turbinas (Fernández Mosconi et al., 2003)

MICROTURBINA MICHELL BANKI

La turbina Michell-Banki es una máquina clasificada como una turbina de acción, de entrada radial y flujo transversal. Es utilizada, principalmente, para pequeños aprovechamientos hidro-eléctricos y sus ventajas principales están en su sencillo diseño y en su fácil construcción, lo que la hace atractiva en el balance económico de un aprovechamiento a pequeña escala (ITDG, 2009).

Las principales características de esta máquina son las siguientes: opera con amplios rangos de caudal y altura sin variar demasiado la eficiencia, diámetro no dependiente del caudal, regula

caudal y potencia con álabe ajustable, su construcción es sencilla, pudiendo ser fabricada en pequeños talleres.

La turbina de flujo transversal es especialmente apropiada para ríos con pequeños caudales, que generalmente llevan durante varios meses muy poca agua. La energía del agua es transferida al rotor en dos etapas, lo que también da a esta máquina el nombre de turbina de doble efecto, y de las cuales la primera entrega un promedio del 70% de la energía total transferida y la segunda alrededor del 30% restante (Figura 3). Finalmente, el agua es restituida mediante una descarga a presión atmosférica (grado de reacción igual a cero).

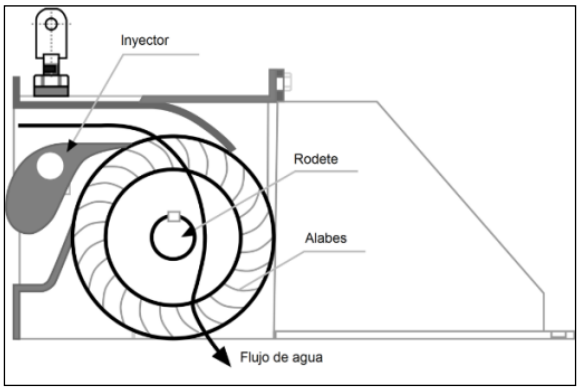


Figura 3.- Componentes Principales de la Turbina Michell-Banki (Paris y otros, 2013).

La presente turbina se diseñó a partir de las siguientes condiciones impuestas: salto efectivo de agua de 25 m, caudal 120 l/s, rendimiento del 60%. La potencia útil obtenida es: 18kW.

La turbina consta de dos elementos principales: un inyector y un rotor. El rotor está compuesto por dos discos paralelos a los cuales van unidos los álabes curvados en forma de arco circular.

La construcción del rotor y el inyector de esta máquina no involucraron tareas de fundición de precisión. Un elemento muy importante para el buen funcionamiento, y que en general requiere de mucha precisión en la construcción, son los álabes del rotor. En este caso para facilitar la construcción de los álabes se utilizó una tubería comercial de acero al carbono sin costura, ésta fue cortada formando un arco de circunferencia con ángulo θ.

Además de las construcción se realizaron los planos y el modelo matemático utilizando un modelo computacional de fluidos CFD (Reyna y otros, 2013). (Figura 4a).

Para la construcción de los distintos elementos de la turbina se emplearon una serie de máquinas herramientas como plegadoras, limadoras, fresadora, torno de control numérico, etc. La totalidad de las piezas que se encuentran en contacto directo con el agua (conjunto rotor inyector), se sometieron a un tratamiento superficial de zincado en caliente para prolongar su vida útil. Tanto el conjunto del rotor como el inyector fueron construidos en acero SAE 1020. El proyecto verificó que se trata de una turbina con un diseño sencillo y de fácil construcción lo que la hace atractiva a pequeña escala.

La máquina se encuentra actualmente instalada en el Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (Figura 4b y 4c).

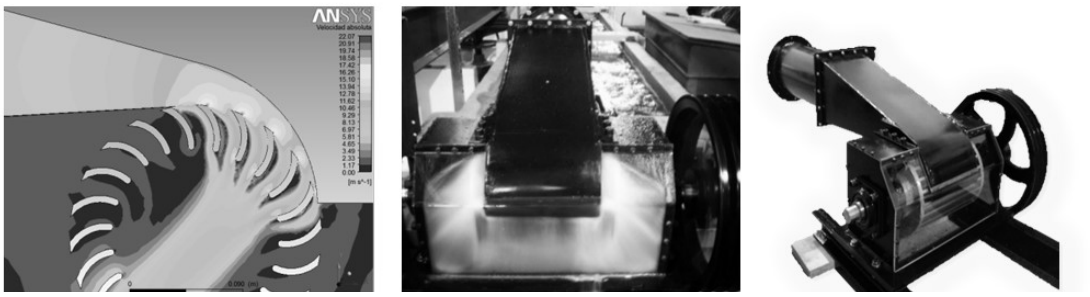


Figura 4.- a) Modelo Matemático CFD. b y c) Turbina Michael Banki instalada en el laboratorio

MICROTURBINA AXIAL

La micro turbina axial es una máquina clasificada como una turbina de reacción, de entrada y flujo axial. A gran escala la más conocida se denomina turbina Kaplan. La misma se utiliza como parámetro de diseño para el cálculo de las máquinas en pequeños aprovechamientos hidroeléctricos.

El rodete está compuesto por unas pocas palas, que le confieren forma de hélice de barco; cuando estas sean fijas, se llama turbina hélice, mientras que si son orientables se denominan turbinas Kaplan; en ambos casos las turbinas funcionan con un único sentido de giro de rotación; son pues turbinas irreversibles. En nuestro caso optamos por el desarrollo de una turbina hélice simplificando el diseño.

Sus características principales son: dimensiones reducidas, velocidades relativamente altas, rendimiento elevado con carga variable, notable capacidad para sobrecargas.

Para la turbina Kaplan la velocidad absoluta del álabe U es constante a lo largo de la vertical (no así en la dirección radial del álabe, que U cambia según el radio de cada punto). Así, las ecuaciones de Euler quedan de la siguiente manera.

$$E = \frac{U}{g}(C_{U1} - C_{U2}) \quad [4]$$

$$E_{tot} = \frac{1}{2g}\left[\left({C_1}^2 - {C_2}^2\right) + \left({W_{r2}}^2 - {W_{r1}}^2\right)\right] \quad [5]$$

La máquina que se desarrolló busca producir como mínimo un kilovatio. El caudal considerado es de 0,1 m^3/s y una altura neta de 5 m. Con estos valores, considerando un rendimiento de aproximadamente 60%, obtenemos una potencia útil aproximada de 3 kW.

En estas máquinas el perfil de los alabes tiene características hidrodinámicas con poca curvatura, que facilita su rendimiento y aumenta la velocidad del fluido (agua), estas características hacen que estas turbinas se construyan de diámetros de rodete bastante pequeños.

Los álabes del rotor tienen un perfil de ala de avión y desarrollo helicoidal. El perfil de ala permite obtener una acción útil del agua sobre el álabe en el movimiento que aquella tiene respecto a éste. La forma helicoidal o alabeo se justifica, en virtud de que la velocidad relativa del flujo varía en dirección y magnitud con el radio, supuesta ω (velocidad angular) constante, y considerando la velocidad absoluta constante en magnitud y dirección. Además, para los álabes se requiere de un acabado superficial pulido, ya que la rugosidad permitida entre la superficie de contacto y el agua depende del caudal.

La fabricación de los álabes constituye el principal inconveniente para lograr un equipo económico, porque requiere de fundición de precisión. Si sólo se usan álabes de espesor constante, planos o curvados se obtienen menores coeficientes de sustentación y mayores de resistencia, por lo que en conjunto resultaría menor la eficiencia, además de no aprovechar por completo el intercambio de energía por parte del fluido al incidir sobre los álabes. Un ejemplo de eficiencias se tiene en el artículo de Espinoza (1991), donde la turbina axial sin utilizar álabes aerodinámicos obtuvo un valor de eficiencia de 40%, mientras que la turbina axial hecha por ITDG (Hidrored, 1995) que posee álabes aerodinámicos tiene eficiencia de casi 60%.

Se estudió la alternativa de no utilizar álabes aerodinámicos, entre las que se incluyen la construcción de los mismos a partir de una placa con cortes hasta un diámetro central y luego torsionadas en forma helicoidal. Con este fin se trabajó en el modelo matemático de la turbina utilizando como base el software Solid Works para el desarrollo de las diferentes componentes. A su vez, dicho programa permite la animación de la pieza y la simulación del flujo, lo que ayuda a la compresión del funcionamiento de la máquina.

En la figura 5 puede observarse la máquina hidráulica, con la simulación del flujo desarrollado. También, se encuentran esquematizadas las diferentes direcciones en las cuales se descompone la velocidad absoluta para el cálculo de las distintas partes de la turbina.

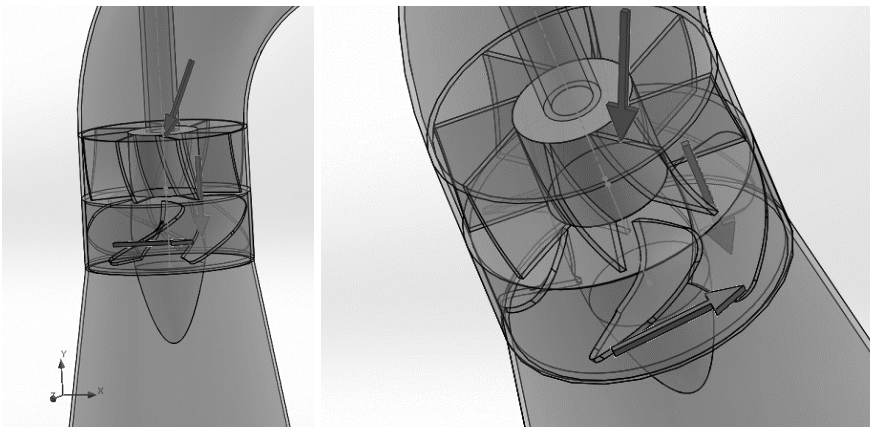


Figura 5.- Álabes directores y rotor con sus Vectores de velocidad.

Finalmente, los planos fueron enviados al Instituto Técnico Secundario Cristo Obrero de Carlos Paz para su materialización. Dicho instituto maquinó las diferentes partes de la turbina que se muestran en la fotografía.

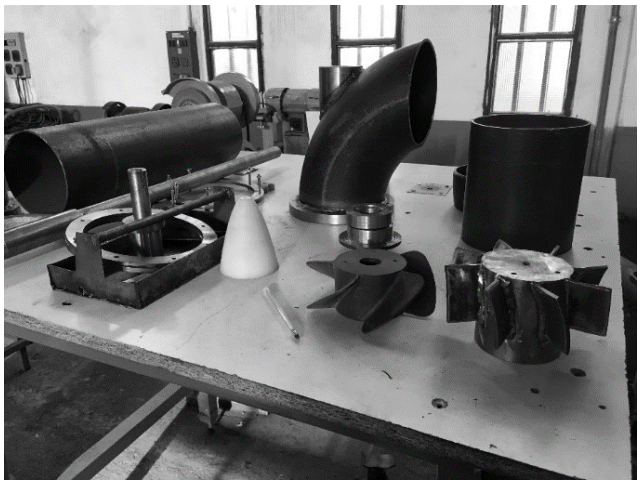


Figura 6.- Conjunto completo de partes de la turbina axial.

Figura 7.- Rotor y estator

Figura 8.- máquina terminada

A su vez, se imprimieron el rodete y estator de la turbina de manera de contar con un sistema simplificado donde se observen con claridad las partes de la turbina que, al estar montada la construida, no podrán observarse debido a encontrarse en funcionamiento (Figura 9).

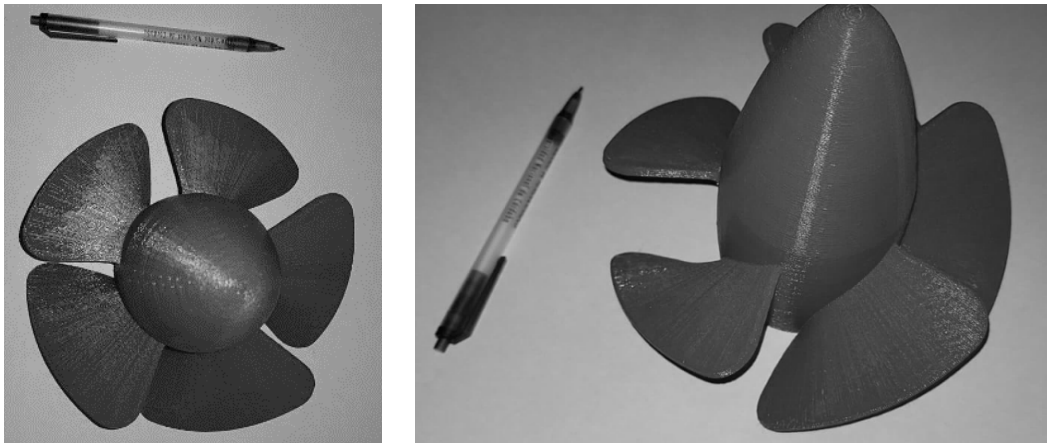


Figura 9.- Rodete y estator en resina de impresora 3D.

TURBINA TURGO

La turbina Turgo es una turbomáquina motora de acción, a chorro libre, de flujo radial. El rodete de la misma se asemeja a un medio rodete Pelton, como si a este se le dividiera mediante un plano que pasa por las aristas de las cucharas y sea perpendicular al eje. Tiene varias ventajas sobre la turbina Francis y la Pelton en determinadas aplicaciones. El rodete es más barato de fabricar que el de una Pelton, no necesita una carcasa hermética como la Francis, dispone de una velocidad específica más elevada y puede manejar un mayor flujo para el mismo diámetro que una turbina Pelton.

El distribuidor de la turbina Turgo consiste básicamente en un inyector del tipo que proyecta un chorro de agua inclinado respecto al eje del Rodete, en un ángulo de 15º a 22.5º.

Para la turbina Turgo la velocidad absoluta del álabe U es constante, así, las ecuaciones de Euler quedan de la siguiente manera.

$$E = \frac{U}{g}(C_{U1} - C_{U2}) \quad [6]$$

$$E_{tot} = \frac{1}{2g}\left[\left({C_1}^2 - {C_2}^2\right) + \left({W_{r2}}^2 - {W_{r1}}^2\right)\right] \quad [7]$$

En este proyecto se diseñó una micro turbina Turgo a partir de un caudal de 0,01 m^3/s y una carga de 26 m. Dichas condiciones, junto con un rendimiento aproximado de 60% generan una potencia útil de 1,5 kW. Analizando los triángulos de velocidades y el ángulo de impacto del álabe se calculó el diámetro de salida del inyector de 3 cm. Así, se obtuvo una máquina cuyo diámetro externo es de aproximadamente 28 cm y el largo de la cuchara 6 cm, la misma gira a 975 rpm.

Dicha turbina se representó en un modelo de SolidWorks y se realizaron simulaciones del flujo y animaciones del movimiento de la misma, lo que simplifica significativamente su comprensión (Figura 10 y Figura 11).

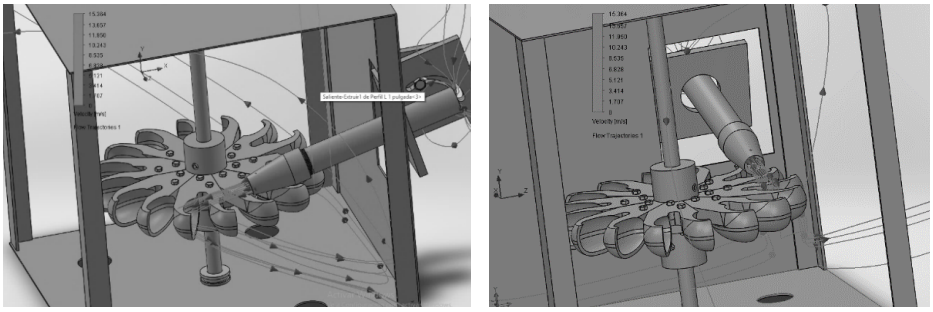


Figura 10.- Turbina Turgo. Comparación SolidWorks y máquina real.

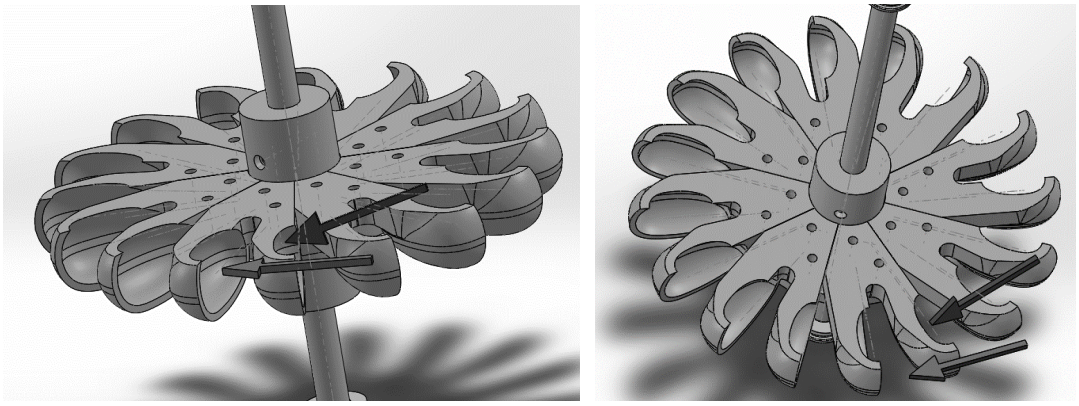


Figura 11.- Vectores de velocidad.

Luego, se adaptó el diseño para poder materializar la turbina en el laboratorio de impresiones 3D de la UNC (figura 12 b)y se procedió al montaje de la misma (Figura 12a). Se obtiene así, como resultado, un banco de prueba donde se observa con claridad el funcionamiento de dicha máquina junto con un modelo computacional que muestra detalladamente cada una de sus partes.

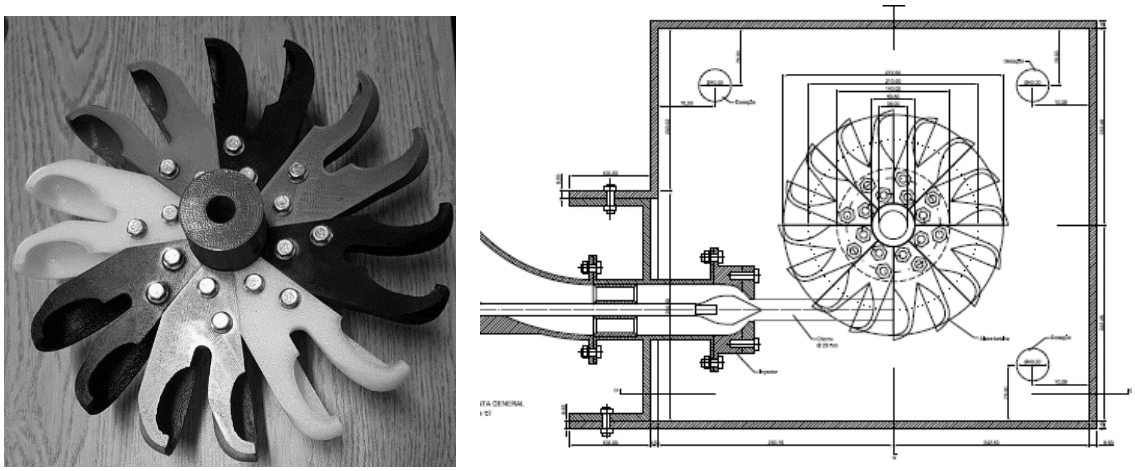


Figura 12a y b.- Turbina Turgo. Rodete impreso en impresora 3D. Plano de la turbina Turgo.

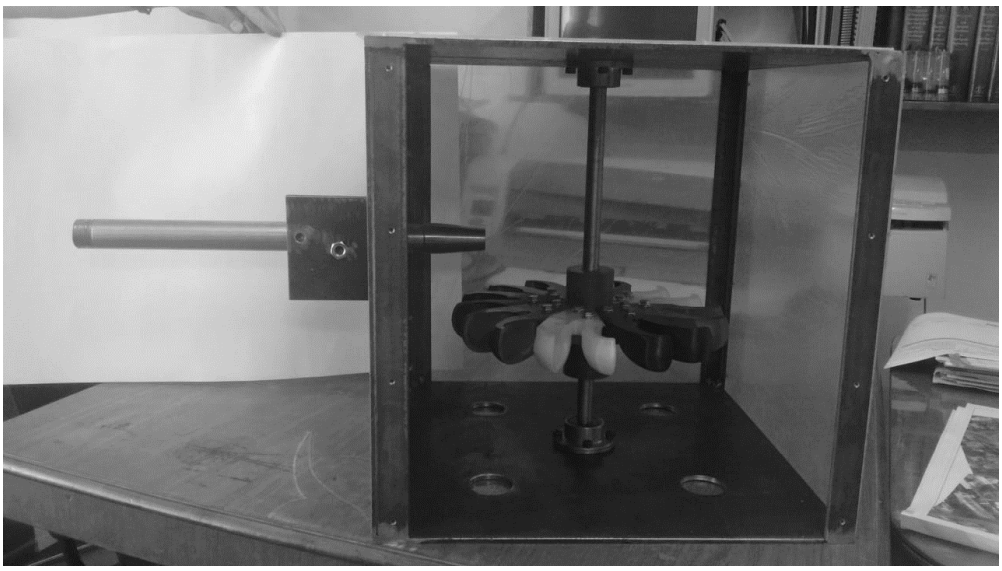


Figura 13.- Turbina Turgo y caja para demostración en aulas.

CONCLUSIONES

La principal causa del escaso desarrollo que tiene en la Provincia de Córdoba las microcentrales es el desconocimiento y falta de acceso a la tecnología y operación de estas máquinas.

La mejor forma de promover el futuro uso de energías renovables es concientizar a los alumnos de su importancia y enseñar y familiarizar su uso, mostrándose como una opción efectiva y rentable. Los alumnos deben salir de la Universidad reconociendo la factibilidad de aplicar energías renovables en sus futuros desarrollos como ingenieros y la necesidad de dicho uso para que las consideren como una opción al momento de resolver problemas del suministro de energía.

Para acelerar la aplicación de sistemas alternativos en las zonas rurales, y hacer de esta una práctica habitual, se necesita desarrollar equipos adecuados, adaptarlos para su producción progresiva en las industrias locales, y establecer un sistema de financiación en colaboración con los bancos locales para asistir a los usuarios y propietarios potenciales. Existe una demanda insatisfecha de equipos robustos y confiables que puedan suministrar pequeñas cantidades de energía a bajo costo (Reyna et al, 2016).

El desarrollo de máquinas hidráulicas en el ámbito de las Universidades tiene un impacto directo en la promoción de estas energías.

La generación de electricidad a través de microcentrales hidroeléctricas resulta hoy una opción rentable para la diversificación energética y el desarrollo de comunidades sin acceso al sistema eléctrico interconectado. La misma sólo será posible de ser promovida si se desarrollan y estudian en más profundidad las microturbinas hidroeléctricas.

Siendo los diagramas vectoriales la mayor dificultad que se les presenta a los alumnos para aprender y comprender turbomáquinas, con una simulación en 3D de dichas máquinas y las mismas materializadas, resulta mucho más sencillo comprender el proceso de diseño para mejorar la eficiencia de las máquinas. Así, los alumnos saldrán de la Universidad con las herramientas necesarias para profundizar su estudio en turbomáquinas y mejorar el sistema de microgeneración.

Agradecimientos. *A la Secretaría de Ciencia y Tecnología de la Universidad Nacional de Córdoba (SECYT) por apoyar el desarrollo de estos proyectos. Al director del colegio secundario Instituto Técnico Cristo Obrero de Carlos Paz por apoyar el desafío de construir máquinas hidráulicas en su colegio y permitir acercar las energías renovables a los niveles de enseñanza media.*

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Cambridge Institute for Sustainability Leadership (CISL) (2017) Cambio Climático: Implicaciones para el Sector Energético. Hallazgos Claves del Quinto Informe de Evaluación (AR5) del Grupo Intergubernamental de Expertos. www.cisl.cam.ac.uk/ipcc

Espinoza Silva, J. (1991). *Desarrollo simplificado de turbina axial tipo "S" para micro aprovechamientos hidráulico*s. Informe de Proyecto de FONDECYT-90/0123, pp.1- 11.

Fernández Mosconi, J., Audisio, O. & Marchegiani A. (2003). *Pequeñas Centrales Hidráulicas. Apuntes de clase*. Universidad Nacional del Comahue. Facultad de Ingeniería. Neuquén, Argentina.

Góngora, C. (2012). *Micro Turbinas para pequeños aprovechamientos hidroeléctricos. Turbina Michell-Banki.* Tesis de Maestría. Maestría en Ciencias de la Ingeniería – Mención en Recursos Hídricos. Universidad Nacional de Córdoba. Argentina.

Grosso Ma. Florencia. *Energías renovables para comunidades Aisladas*. *Desarrollo de una Micro turbina Axial.*

IPCC-Intergovernmental Panel on Climate Change (2011). *Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation*. ISBN 978-92-9169-131-9. Sitio web: http://www.ipcc.ch/report/srren/

ITDG (2004). Soluciones Prácticas. Ficha Técnica Nº 2. Turbina Michell Banki. http://www.solucionespracticas.org.pe/ficha-tecnica-n2-turbina-michell-banki**.** Consultado noviembre de 2016.

Labandeira, X., Linares, P. & Würzburg, K. (2012). *Energías Renovables y Cambio Climático* – Econmics for Energy. WP 06/2012.
Mataix, C. (2009). *Turbomáquinas Hidráulicas. Turbinas hidráulicas, bombas, ventiladores.* Universidad Pontificia Comillas. 1ª ed., 1ª. 1720 páginas; 24x17 cm. ISBN: 8484682528 ISBN-13: 9788484682523
Mohaded, M. G. *Turbina hidráulica para generación de energía Turgo.* Práctica Supervisada. Universidad Nacional de Córdoba. Argentina.
Polo Encinas, M. (1976). *Turbomáquinas Hidráulicas*. México. LIMUSA.
Reyna, T; Góngora, C.; Reyna, S.; Lábaque, M.; García, M.; Riha, C. (2013).Turbinas Michell-Banki. Modelaciones Matemáticas De Alabes. XXIV Congreso Nacional del Agua.
Reyna T, Reyna, S., Lábaque M., Riha C, Groso F. (2016) Applications of Small Scale Renewable Energy. *Journal of Business and Economics, USA*. Academic Star Publishing Company. ISSN: 2155-7950.
Reyna, T., Reyna, S., Lábaque, M., Riha, C. & Giménez, E. (2012). *Aplicaciones de Usos de Energías Renovables. Microturbinas de Generación Hidroeléctrica*. XXV Congreso Latinoamericano de Hidráulica S.J., Costa Rica. 9 al 12 de septiembre de 2012

IAHR **AIIH**

XXVIII CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA
BUENOS AIRES, ARGENTINA, SEPTIEMBRE DE 2018

PROBLEMÁTICA ENTRE EL CAMBIO EN LA PRECIPITACIÓN EN LA PROVINCIA DE CÓRDOBA Y EL DISEÑO DE INFRAESTRUCTURA HIDRÁULICA

M. Lábaque[1]; T. Reyna[1], J. Valdes[2] y S. Reyna[1]
[1]Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales – Universidad Nacional de Córdoba, Argentina
[2]Dept. of Hydrology and Atmospheric Sciences, The University of Arizona
mlabaque@gmail.com; teresamaria.reyna@gmail.com, jvaldes@email.arizona.edu; santiagoreyna@gmail.com

RESUMEN:

Los desastres naturales obstaculizan significativamente el progreso hacia el desarrollo sostenible y son las inundaciones las principales causas de desastre en el mundo actual. El mejor entendimiento del fenómeno de inundación y sus consecuencias es crucial para el desarrollo. Por otro lado, múltiples líneas de pruebas científicas demuestran que el sistema climático se está calentando. Estos cambios de temperatura pueden generar cambios en la intensidad de las precipitaciones, sus patrones y sus valores medios. Además, la detección de los efectos del cambio climático en el ciclo hidrológico entraña una gran dificultad. Desastres recientes ocurridos en la Provincia de Córdoba, han planteado la necesidad de que se avance en proponer guías de buenas prácticas para incorporar los impactos del cambio climático en la estimación del caudal para la planificación de gestión de emergencias a largo plazo, la gestión de inundaciones a largo plazo, como el diseño y la construcción de protecciones ribereñas, etc. En este artículo se analiza la situación actual y se plantea la necesidad de establecer primero escenarios de emisión de gases invernaderos a considerar en los diseños, actualización de las curvas IDF y consideraciones especiales para la determinación de las condiciones antecedentes que se establecen para las modelaciones.

ABSTRACT:

Natural disasters significantly hinder progress towards sustainable development and floods are the main causes of disaster in the world today. The best understanding of the flood phenomenon and its consequences is crucial for development. On the other hand, multiple lines of scientific evidence show that the climate system is heating up. These changes in temperature can generate changes in the intensity of rainfall, its patterns and its average values. In addition, the detection of the effects of climate change on the hydrological cycle involves great difficulty. Recent disasters in the Province of Córdoba, have raised the need for progress in proposing guidelines for good practices to incorporate the impacts of climate change in the estimation of flow for planning long-term emergency management, flood management in the long term, such as the design and construction of riparian protections, etc. This article analyzes the current situation and raises the need to first establish emission scenarios for greenhouse gases to be considered in the designs, update the IDF curves and special considerations for determining the background conditions that are established for the modeling.

PALABRAS CLAVES: Cambio en la Precipitación; Diseño de Obras Hidráulicas; Córdoba

INTRODUCCIÓN

Los desastres naturales obstaculizan significativamente el progreso hacia el desarrollo sostenible (IPCC, 2014).

Durante la última década, los desastres se han visto exacerbados por el cambio climático y han afectado aproximadamente a 1.500 millones de personas (ONU, 2015). La Oficina de Naciones Unidas para la Reducción de Riesgo de Desastres (UNISDR, 2015) presentó un análisis de tendencias de desastres que mostró que el 91% de los desastres que ocurrieron entre 1995-2015 estaban relacionados con el clima (amenazas hidrológicas, meteorológicas y climatológicas).

Además, es probable que las áreas urbanas sufran los impactos más adversos (The World Bank, 2008). Las ciudades son sistemas frágiles expuestos a cambios rápidos (como su expansión espacial y el aumento de la población), lo que aumenta su vulnerabilidad a los peligros y los impactos climáticos (Pelling, 2003; Wamsler, 2014).

En los últimos años han sido frecuentes los casos de poblaciones inundadas y destruidas a lo largo de todo el planeta.

Esta situación ha llevado a las organizaciones gubernamentales y no gubernamentales, y científicos a buscar estrategias para aumentar la efectividad de los sistemas manejo de riesgo de desastre (DRM siglas en inglés).

Por otra parte las especies vegetales y animales también sufren el cambio climático. Las predicciones actuales de los riesgos de extinción de especias debidas al cambio climático varían ampliamente dependiendo de los supuestos específicos y el enfoque geográfico y taxonómico de cada estudio. Los estudios muestran que los riesgos de extinción se acelerarán con las temperaturas mundiales futuras, amenazando hasta una de cada seis especies según las políticas actuales.

- En la mente de los biólogos quedan pocas dudas de que la Tierra está enfrentando actualmente una pérdida creciente de especies tal que amenaza con rivalizar las cinco mayores extinciones del pasado geológico.
- Desde el año de 1993, el biólogo de Harvard E. O. Wilson estimó que la Tierra está perdiendo alrededor de 30,000 especies por año, lo cual se traduce a la estadística aún más espeluznante de tres especies cada hora. Algunos biólogos han comenzado a pensar que esta crisis de la biodiversidad (esta "Sexta Extinción") es aún más severa y más inminente que lo que Wilson supuso.

En este contexto, incorporar los efectos del Cambio Climático al manejo de desastres e integrarlo con medidas de adaptación al cambio climático (CCA, siglas en inglés) es un enfoque considerado vital (Birkmann & von Teichman, 2010).

Por otra parte, los estudios muestran que los aumentos de las temperaturas, olas de calor, aumento de la desertización, etc. hacen que los montes estén llenos de vegetación seca que se convierte en combustible que alimenta el fuego. El cambio climático no es una causa de incendio**,** sin embargo sí que explica los cambios que se están produciendo en los "nuevos" incendios, empeorando las condiciones de inicio y de propagación. (http://archivo-es.greenpeace.org/espana/es/Trabajamos-en/Bosques/Incendios-forestales-en-Espana/Incendios-forestales-y-cambio-climatico/)

Las inundaciones son las principales causas de desastre en el mundo actual. El mejor entendimiento del fenómeno de amenaza de inundación y sus potenciales consecuencias en nuestra sociedad es crucial para el desarrollo de políticas de control de la inundación, proyectos de reducción del riesgo y otro tipo de estrategias de manejo de las crecidas.

Durante el año 2017, el Ministro de Agua, Ambiente y Servicios Públicos de la Provincia de Córdoba planteó a Profesores investigadores de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (FCEFyN) de la Universidad Nacional de Córdoba (UNC) y de la Universidad de Arizona, la necesidad de que se avance en proponer guías de buenas prácticas para incorporar los impactos del cambio climático en la estimación del caudal para la planificación de gestión de emergencias a largo plazo, la gestión de inundaciones a largo plazo, como el diseño y la construcción de protecciones ribereñas; metodologías para la determinación de la capacidad y el diseño de redes de

drenajes; definir áreas propensas a inundaciones fluviales y de uso de la tierra que pueden afectar la vulnerabilidad de una cuenca hidrográfica a las inundaciones y las afectaciones de los incendios en las respuestas de las cuencas dado que la provincia sufre todos los años las pérdidas de miles de hectáreas de vegetación nativa por efecto de los incendios.

Una guía de orientación de prácticas que incorporen los efectos del cambio climático en la estimación del caudal necesitará proporcionar como mínimo:

- Métodos para estimar cambios en la frecuencia, duración y magnitud de la lluvia
- Métodos para convertir cambios en la lluvia a cambios en la tasa de flujo
- Métodos para convertir los cambios en el índice de flujo a los cambios en la inundación
- Aspectos a tener en cuenta en las cuencas debidas a cambios climáticos que afectan las respuestas de las mismas frente a eventos precipitaciones.
- Algunos casos de estudios para ilustrar estos métodos.

EL CAMBIO CLIMÁTICO Y LA ESTIMACIÓN DEL CAUDAL

Aunque sólo hace un par de décadas atrás se discutía la validez científica del calentamiento global, hoy no sólo existe evidencia probada que lo confirma, sino que también existe el conocimiento de las causas que han generado este fenómeno.

La temperatura global de la superficie de la tierra viene incrementándose desde el siglo XIX y seguirá haciéndolo. En Europa la temperatura media anual ha aumentado en unos 0.8-C durante el siglo XX, siendo la última década (1990-1999) la más caliente registrada hasta ahora, tanto en las temperaturas medias anuales como las temperaturas durante el invierno.

Las causas del calentamiento global y sus derivados cambios climáticos, se pueden explicar en parte por dos acciones humanas: (i) el exceso de emisiones atmosféricas de compuestos químicos que atrapan y/o ayudan a almacenar la energía solar, en donde la tecnología en general, aparece como la gran responsable y, (ii) la destrucción de los recursos naturales destinados a absorber estas emisiones.

Naturalmente no serán únicamente las temperaturas las que sufrirán cambios, los patrones de precipitación van a cambiar considerablemente, dando lugar a que algunas zonas sean más húmedas y otras más secas de lo que son hoy y como se expresó esto afecta además a la vegetación por lo cual se modifican las respuestas de las cuencas.

Es común observar en la actualidad que las nuevas condiciones del clima han vuelto inadecuadas una gran parte de la infraestructura, dado que ésta fue diseñada para condiciones climáticas distintas, vegetación, suelos y usos de suelo distintos al actual.

Específicamente, la mayoría de la infraestructura fue, y aún es, diseñada con la suposición implícita de que el clima es estacionario y las condiciones de la cuenca se mantienen constantes en el tiempo.

De manera tradicional la determinación de la precipitación a ser considerada para el análisis de riesgo de inundación se basa fundamentalmente en el análisis estadístico de las series de registro de eventos ocurridos en el pasado en la zona en estudio con la hipótesis de estacionaridad, al menos en la escala de décadas, y que por lo tanto las precipitaciones en el futuro serían igual a las del pasado inmediato. Así, las series de los elementos climáticos y de sus derivados hidrológicos eran tratadas estadísticamente como estacionarias. Y se utiliza como concepto modelos de transformación lluvia-caudal sin considerar que en muchos casos las condiciones de infiltración de las cuencas tampoco son estacionarias, pueden cambiar las condiciones la evapotranspiración a las temperaturas más cálidas, las condiciones más ventosas que pueden afectar, la pérdida de vegetación; etc. Estos factores pueden ser importantes para estimar los caudales. Una lluvia de una determinada recurrencia no necesariamente genera un caudal de la misma recurrencia, porque depende de diversos factores que involucran la respuesta de la cuenca frente a ese evento de precipitación.

Hoy la hipótesis de que las series de precipitación son estacionarias aparece como poco apropiada (Milly et al, 2008). El planeta ha entrado en un rápido cambio climático acelerado por las acciones del hombre.

Múltiples líneas de pruebas científicas demuestran que el sistema climático se está calentando. Estos cambios de temperatura pueden generar cambios en la intensidad de las precipitaciones y sus valores medios.

La detección de los efectos del cambio climático en el ciclo hidrológico entraña una gran dificultad.

El seguimiento de la precipitación y los caudales circulantes en los ríos es más difícil que, por ejemplo, el seguimiento de las temperaturas, debido al alto grado de intervención humana en el ciclo hidrológico, las pérdidas de la vegetación, incendios entre otros. Sin embargo, resulta inmediato deducir que las tendencias observadas en variables relacionadas con los recursos hídricos, como precipitación o temperatura, tendrán un efecto que será detectable a mediano y largo plazo.

Esta situación vuelve urgente la necesidad de desarrollar una metodología para la planificación y el diseño que incorpore el efecto de Cambio Climático.

ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO GLOBAL

Los escenarios de cambio climático son una representación plausible y a menudo simplificada del clima futuro, basados en las consecuencias potenciales del cambio climático generado por las actividades humanas, y que sirven de insumo para las simulaciones de los impactos.

Estos escenarios no son pronósticos climáticos, ya que cada escenario es una alternativa de cómo se puede comportar el clima futuro debido a la continuidad o no de actividades humanas impactantes.

Los escenarios pueden ser optimistas (considerando un cambio importante en las emisiones de gases debido a cambios de tecnologías) o pesimistas (considerar ningún cambio en la tendencia de calentamiento o cambios reducidos).

En el Quinto Informe IPCC (2014) se han definido 4 nuevos escenarios de emisión, las denominadas Trayectorias de Concentración Representativas (RCP, por sus siglas en inglés). Éstas se caracterizan por su Forzamiento Radiativo (FR) total para el año 2100 que oscila entre 2,6 y 8,5W/m^2.

Las cuatro trayectorias RCP comprenden un escenario en el que los esfuerzos en mitigación conducen a un nivel de forzamiento muy bajo (RCP2.6); dos escenarios de estabilización (RCP4.5 y RCP6.0) y un escenario con un nivel muy alto de emisiones de GEI (RCP8.5) (Figura 1).

Los nuevos RCP pueden contemplar los efectos de las políticas orientadas a limitar el cambio climático del siglo XX frente a los primeros escenarios de emisión utilizados en el IPCC (2000) denominados SRES, por sus siglas en inglés, que no contemplaban los efectos de las posibles políticas o acuerdos internacionales tendentes a mitigar las emisiones.

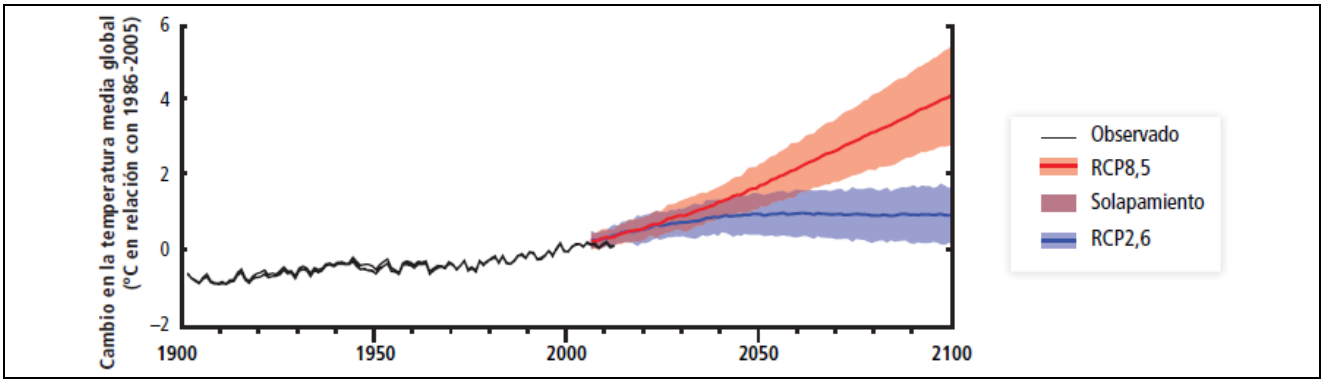


Figura 1.- Trayectorias de Concentración Representativas RCP8,5 y RCP2,6 (IPCC, 2014).

La decisión sobre cuál de los diversos escenarios descritos parece más probable se deja abierta, puesto que el IPCC no asume el riesgo de asignar probabilidades a cada uno de ellos.

Los cambios proyectados en la temperatura media anual para distintos escenarios de emisión de gases de efecto invernadero desarrollados por el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC), pueden usarse, junto con otros factores, para estimar los cambios en las precipitaciones a fin de proporcionar un método de detección básico.

También se han desarrollado otros métodos más avanzados para estimar las precipitaciones. Estos incluyen: generadores meteorológicos, ajustes empíricos, selección analógica a partir de datos observados, reducción de escala de modelos globales, modelos climáticos regionales y modelos meteorológicos a mesoescala. La selección del método más apropiado, está determinado por la disponibilidad de los datos, la precisión deseada y la experiencia disponible.

Por otro lado, las elecciones de escenarios a estudiar están fuertemente vinculadas a la naturaleza del estudio. Para todos los análisis, se recomienda utilizar diversos escenarios basados en distintos supuestos con respecto a las fuerzas determinantes. Así, en la mayoría de los análisis debería utilizarse más de una familia.

Por ejemplo, para evaluar la robustez de las opciones en términos de impacto, vulnerabilidad y adaptación podrían ser necesarios escenarios con emisiones similares, pero de características socioeconómicas diferentes, tal como reflejan los seis grupos de escenarios.

Para los análisis de mitigación, podría ser necesario variar tanto las emisiones como las características socioeconómicas. Para los análisis de escala nacional o regional, los escenarios más apropiados podrían ser los que mejor reflejen circunstancias y perspectivas específicas.

El primer paso debería se entonces, establecer los escenarios a considerar en la Provincia de Córdoba a fin de analizar los riesgos de inundación futura y el diseño de obras de protección y drenaje.

En la Tercera Comunicación Nacional de la República Argentina a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático de la Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación (2015) se analizan dos escenarios: RCP, 4.5 y 8.5. El primero corresponde a emisiones moderadas, pero no a un escenario de extrema mitigación del cambio climático como en el del RCP 2.6. (no se estudiaron los escenarios climáticos basados en el RCP 2.6 al considerar que no aportaría información adicional). Por otra parte, el escenario RCP 8.5 corresponde al caso extremo en que las emisiones continuarán creciendo con las tendencias actuales hasta fin de siglo.

La disponibilidad de escenarios climáticos informada en esa comunicación indica que en la base CMIP5 están accesibles simulaciones del siglo XX y proyecciones de escenarios climáticos del siglo XXI provenientes de unos 42 experimentos con MCGs. Previo a la validación de los modelos se realizó una selección tomando como criterio que estuvieran disponibles para los escenarios de concentración RCP 4.5 y RCP 8.5 y tuvieran salidas diarias de sus proyecciones. Dentro de los que cumplieron con estos requisitos, se seleccionaron 14 experimentos de casi otros tantos MCGs que presentaban una resolución horizontal de 2° o mayor.

En cuanto a los MCRs, están disponibles para la región, 11 experimentos de 7 MCRs anidados en MCGs del CMIP3 del proyecto europeo CLARIS, a los que se les aplicó el proceso de validación. Los experimentos disponibles anidados con MCGs para el siglo XX cubren en general el período 1961-1990. En relación a las proyecciones climáticas, las mismas abarcan en general dos períodos (2011-2040) y (2071-2100). Algunos MCRs del proyecto CLARIS tienen algunos experimentos continuos sobre todo el período (1961-2100).

CAMBIO CLIMÁTICO EN ARGENTINA

Por su situación geográfica y estructura productiva, la Argentina es uno de los países más afectados por el calentamiento global. De acuerdo al informe "Modelos Climáticos" desarrollado por el Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera (CIMA-Conicet, 2007), en los últimos 50 años el aumento promedio de las temperaturas en el país alcanzó medio grado, pero en la Patagonia superó 1°C.

Investigaciones llevadas a cabo en el CIMA, observaron tendencias de cambio climático en los últimos 50 años que muestran una mayor frecuencia de olas de calor en el Norte y Este del país, y una disminución de las heladas en la Patagonia. También se observó un aumento de las precipitaciones intensas en la zona Centro y Este, y mayor sequía en el Noroeste y la Patagonia.

Particularmente, entre 1960 y 2010, en la región centro del país ha habido aumentos significativos de la precipitación anual y en las estaciones de verano y otoño e invierno (confianza alta) (Figura 2). Los extremos de precipitación diaria, su intensidad y la frecuencia de su ocurrencia presentan tendencias positivas, superpuestas a variabilidad decadal y están acompañados por una disminución en la cantidad de días sin lluvias al año (confianza alta).

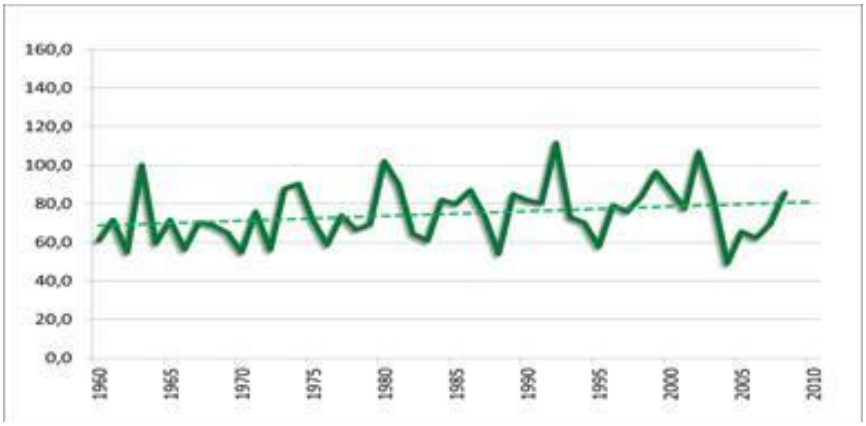


Figura 2.- Promedio de la precipitación diaria máxima del año en la Región Centro (Cima-Conicet, 2007).

SITUACIONES PLANTEADAS EN LA PROVINCIA DE CÓRDOBA

Actualmente en la Provincia de Córdoba se vienen desarrollando fenómenos climáticos de gran intensidad que ha motivado el establecimiento de proyectos internacionales para su estudio. De manera particular la Ciudad de Córdoba, capital de la provincia de Córdoba (Argentina), se desarrolla a ambas orillas del río Suquía, y ha sufrido numerosos procesos de inundación desde los tiempos de su fundación, pero este fenómeno se ha venido produciendo cada vez con mayor recurrencia, viéndose afectada gran parte de la población e infraestructura ribereñas.

Las IDF disponibles de la Ciudad de Córdoba (CIRSA – DIPAS,1994) fueron obtenidas de una serie pluviográfica de 34 años, en el período 1943-1978, y son utilizadas para definir recurrencias hasta 200 años.

Esta situación se ha replicado actualmente en numerosas localidades de toda la provincia. Una de los últimos eventos trágicos se originó en el año 2015 con una crecida que afectó a las localidades de Villa Allende, Mendiolaza, Unquillo, Río Ceballos, Cerro Azul, Agua de Oro, La Granja, y Salsipuedes (Figura 3) y dejó un saldo de seis muertos, 12 puentes afectados (ocho parcialmente y otros cuatro destruidos totalmente) y daños de los cuales la población aún no se ha recuperado. Estas localidades se encuentran aproximadamente a 40 km de la Ciudad de Córdoba.
El 15 de febrero de 2015, según registros periodísticos (no se cuenta con datos oficiales de la tormenta), cayeron 250 milímetros de lluvia en 15 horas, cuando la media anual es de 700 mm.

El evento fue caratulado como el peor desastre natural en más de 20 años.

Para las IDF de la Ciudad de Córdoba, el valor para Tr 200 años es de 9,82, la recurrencia del evento del 2015 fue superior.

Figura 3.- Imagen de los daños originados por la crecida del 15 de febrero de 2015 en la localidad de Río Ceballos (gentileza Lucila Espataro)

La PMP para 24 hs en esa zona es de 300 mm en 24 hs (Figura 4).

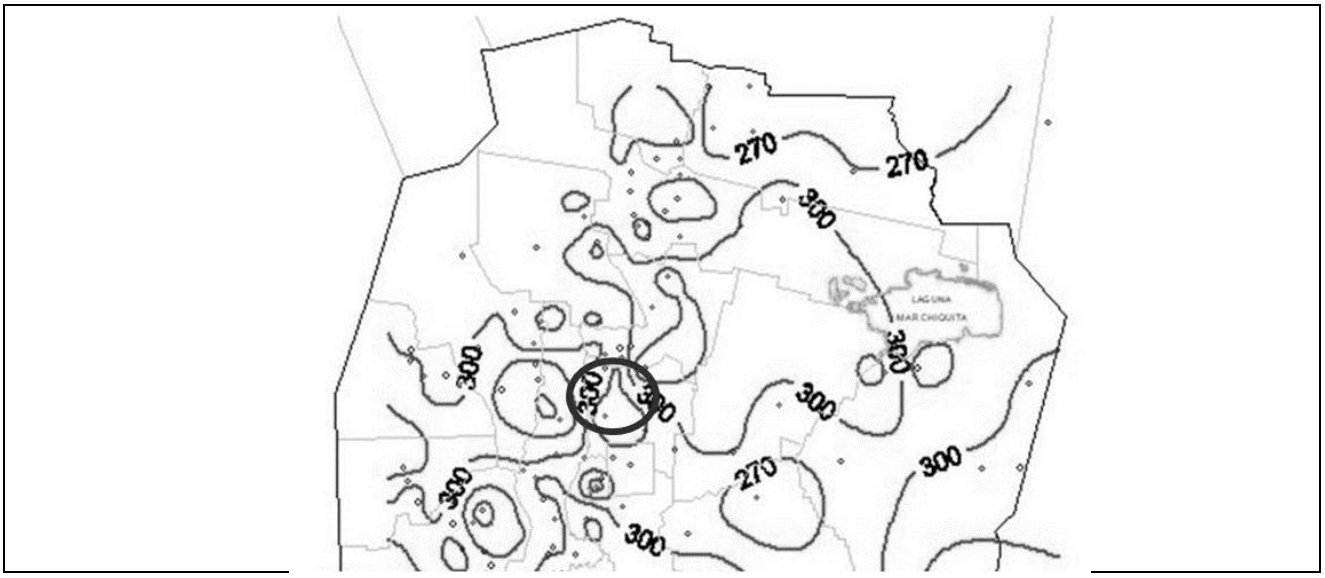


Figura 4.- PMP definida para 24 hs (Camaño Nelly y otros, 2000)

Una situación similar se volvió a vivir en enero de 2016 donde, según datos previstos por Defensa Civil, en Río Ceballos cayeron más de 160 milímetros, en la zona central de Unquillo 130 milímetros, mientras que en Saldán fueron casi 50 milímetros.

La provincia de Córdoba presenta el "honor" de poseer tormentas tan intensas que ha suscitado el interés internacional de expertos en tormentas intensas y que actualmente desarrollan el denominado "Proyecto Relámpago". Se sustenta en que los vientos húmedos del Amazonas y el Caribe chocan contra las distintas zonas montañosas de nuestro país en las sierras y luego suben con gran energía para provocar nubes altas y cargadas eléctricamente. La topografía cordobesa tiene un rol protagónico en el desarrollo de tormentas extremas que luego se conducen a Paraguay y el sur de Brasil. Precisamente, estas tormentas son las que convierten el sureste de América del Sur en la región del planeta donde ocurren las tormentas más intensas a una altitud de 16 kilómetros (cuando el promedio es 10 kilómetros de altura). (http://www.radiocanal.com.ar/noticia/proyecto-relampago-un-cazador-de-tormentas-que-llegara-a-nuestra-provincia-94500)

ESTIMAR LOS CAMBIOS EN LAS PRECIPITACIONES DEBIDO AL CAMBIO CLIMÁTICO

Cualquier consideración del efecto del cambio climático sobre las inundaciones debe comenzar con los efectos en las precipitaciones. Existen distintos factores a considerar para estos casos: uno es estimar el cambio en la intensidad de las precipitaciones (valores extremos), las condiciones antecedentes, etc.

Los efectos del cambio climático actúan sobre el ciclo hidrológico, modificando no solo la intensidad de las precipitaciones, sino también sus patrones de distribución. Los cambios en la cantidad de días entre eventos de precipitación también han cambiado, como también los días seguidos de altas temperaturas. Esta condición impacta de manera directa en el flujo de los ríos y en los eventos de inundación y por lo tanto debe ser considerada en el diseño de obras de drenaje.

El estudio de los impactos de la variabilidad del clima y del cambio en la respuesta de la precipitación es complejo porque los efectos de gran escala, que fuerzan el cambio del clima, no están acoplados linealmente con los forzamientos locales y regionales y, por lo tanto, esos impactos no pueden ser determinados con facilidad (Acevedo Aristizabal y Boveda Jaramillo, 2011)

Además, la misma cantidad de precipitación con diferentes frecuencias e intensidades, podría dar lugar a diferencias importantes en la escorrentía superficial, la evaporación y la condición del suelo, con lo cual se afecta el balance hídrico de largo plazo,

Los modelos de IDF, como todos los modelos de análisis de frecuencia, tienen la desventaja de perder información en relación de esa secuencia de eventos. De manera general, años lluviosos presentan numerosas tormentas importantes para una zona en cuestión, de la cual, en un análisis IDF, sólo se toma la mayor descartando las siguientes, mientras que la elección de la mayor tormenta de un año seco será posiblemente, de intensidad menor que las descartadas en años lluviosos.

La pérdida de esta información se hace más importante bajo el efecto de cambio climático porque, según se ha visto observado, la distribución temporal de los eventos de precipitación se ha modificado. El planeta ha entrado en un rápido cambio climático acelerado por las acciones del hombre, y la linealidad que es necesario considerar para poder aplicar la metodología clásica de transformación lluvia caudal no se muestra como válida. Por otra parte, se han generalizado situaciones de inundación frente a eventos de poca magnitud pero que se presentan a continuación de varios eventos que modificaron las condiciones de infiltración del suelo.

Este contexto conduce a que sea particularmente importante el estudio que considere escenarios posibles del clima en el futuro a nivel local para ver los efectos del mismo frente a los eventos de precipitación e incorporarlos en los estudios de las escorrentías para poder definir criterios que tengan en cuenta el riesgo para el proyecto de obras.

Como expresa Mesa (2006) si el cambio climático trae como consecuencia el incremento o decremento de las probabilidades de la precipitación, incluso las obras bien diseñadas experimentan un riesgo de falla. La hipótesis de estacionariedad de los procesos hidrológicos colapsa ante el cambio climático.

En los últimos 30 años, las inundaciones fueron el desastre natural más destructivo en Argentina, impactando a 13 millones de personas y causando, al menos, 8.9 billones de dólares en daños materiales.

Un relevamiento reciente, realizado en medios gráficos, publicado por Rasmussen y otros (2014), muestra que, durante la primavera y el verano, las regiones más afectadas por inundaciones, entre 1998 y 2013, se ubican en la zona de Sierras de Córdoba y en Mendoza.

La siguiente tabla muestra la gran variación que sufre la provincia de Córdoba en sus parámetros medios climáticos en los diferentes años (Clima Córdoba Aeródromo)

Datos climáticos: 1957 – 2012. Datos reportados por la estación meteorológica: 873440 (SACO)| Latitud: -31.31 | Longitud: -64.21 | Altitud:484)

Año	Tempe	TM	Tm	PP	V	RA	SN	TS	FG	TN	GR

Año	Tempe	TM	Tm	PP	V	RA	SN	TS	FG	TN	GR
1957	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1958	17.3	24.3	11.2	-	12.3	73	0	26	9	0	0
1965	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1967	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1968	17.9	24.5	11.6	-	13.1	82	0	42	19	0	2
1973	16.9	22.8	10.8	-	11.9	105	7	42	17	0	3
1974	17.4	23.6	11.1	-	11.3	137	7	80	18	5	5
1975	17.3	23.7	10.9	-	13.1	146	6	82	32	12	3
1976	17.0	23.4	10.7	-	13.4	116	4	53	15	1	3
1977	17.7	24.2	11.5	856.47	14.0	114	3	44	13	0	2
1978	16.7	23.2	11.2	1078.23	12.0	105	0	53	21	0	0
1979	16.8	24.7	10.1	767.13	11.6	115	3	44	11	0	0
1980	17.7	25.6	10.4	784.37	12.2	99	5	52	20	0	3
1981	17.0	25.0	10.5	1087.69	11.1	108	1	50	25	0	3
1982	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1983	17.0	24.4	11.0	1108.97	12.2	100	0	53	14	0	4
1984	16.8	23.7	11.2	1100.61	11.6	116	2	47	18	0	1
1985	17.5	24.0	12.2	-	12.0	126	0	64	21	0	1
1986	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1987	17.4	24.4	11.3	579.90	12.1	102	2	61	13	1	3
1988	17.2	24.9	10.5	704.30	10.3	88	1	53	13	0	2
1989	18.1	25.8	11.6	589.52	13.7	84	0	67	13	3	2
1990	17.5	25.2	11.5	1072.15	11.3	118	0	55	21	0	2
1991	17.4	25.1	11.6	741.92	12.2	109	0	64	27	0	1
1992	17.0	24.1	11.3	1284.21	13.3	110	0	66	15	1	2
1993	17.1	25.1	10.9	1099.80	13.0	93	0	62	10	0	1
1994	17.9	25.6	12.0	714.75	13.2	88	0	58	12	0	0
1995	17.8	26.1	10.8	551.17	13.3	81	1	54	6	1	0
1996	17.6	25.4	11.0	1422.69	13.4	105	1	70	13	0	1
1997	17.9	25.7	11.8	916.41	13.0	104	0	66	10	1	1
1998	16.8	24.1	11.0	705.60	12.6	103	0	52	21	1	1
1999	16.9	24.3	11.0	-	11.9	115	0	56	28	0	1
2000	16.7	24.2	10.9	-	12.6	125	1	49	19	0	2
2001	17.4	24.8	11.8	-	12.9	132	0	58	23	0	4
2002	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2003	17.6	25.4	11.4	975.13	13.7	110	0	55	24	0	5
2004	17.6	25.5	11.5	821.93	13.4	91	0	49	11	0	0
2005	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2006	18.0	26.1	11.6	-	13.9	93	0	53	19	0	1
2007	16.8	24.8	10.9	-	13.1	115	3	61	25	0	0
2008	17.9	25.9	11.6	-	12.8	93	2	51	12	0	2
2009	18.4	26.8	11.9	988.57	13.9	96	1	53	9	0	3
2010	17.4	25.5	11.3	-	13.2	112	1	54	17	0	2
2011	17.9	26.3	11.6	-	13.6	100	1	49	20	0	2
2012	18.2	26.5	11.8	870.20	13.9	101	1	64	13	0	2

Año	Tempe	TM	Tm	PP	V	RA	SN	TS	FG	TN	GR
2013	17.2	26.1	9.8	-	13.8	99	0	57	12	0	3
2014	17.1	25.8	10.2	861.81	13.3	112	0	58	30	0	0
2015	17.2	25.6	10.9	-	11.9	122	0	72	21	0	1
2016	16.3	24.8	9.7	987.82	11.9	131	1	62	28	0	1
2017	17.3	26.3	10.1	-	13.2	114	0	62	29	0	4

T	Temperatura media anual
TM	Temperatura máxima media anual
Tm	Temperatura mínima media anual
PP	Precipitación total anual de lluvia y/o nieve derretida (mm)
V	Velocidad media anual del viento (Km/h)
RA	Total días con lluvia durante el año
SN	Total días que nevó durante el año
TS	Total días con tormenta durante el año
FG	Total días con niebla durante el año
TN	Total días con tornados o nubes de embudo durante el año
GR	Total días con granizo durante el año

En estas situaciones, el comportamiento de la obra diseñada sólo podrá ser evaluado a través de la simulación continua de eventos. El análisis estocástico se muestra entonces como una herramienta valiosa de información de los registros pasados y permite incorporar el cambio climático introduciendo escenarios futuros en las series para completar el estudio.

Sin embargo, es necesario plantear algunos métodos simples que permitan resolver problemas de diseño de obras de categoría menor (alcantarilla en rutas vecinales, predios deportivos, etc.)

El uso de IDF es una metodología generalizada en nuestro país que tienen la ventaja de ofrecer una herramienta simple que permite definir una tormenta de proyecto para un estudio preliminar.

Pero es posible que estas curvas deban modificarse para tener en cuenta los posibles efectos del cambio climático (Watt y Marsalek, 2013).

Esto define la necesidad de realizar acciones urgentes para examinar la precisión e incertidumbre de las curvas de IDF que se utilizan actualmente para el diseño del sistema de recolección de aguas pluviales urbanas, teniendo en cuenta las proyecciones de futuras lluvias de corta duración bajo el impacto de cambio climático.

Existen metodologías disponibles de manera de estimar las futuras modificaciones de los índices de precipitación debido a las variaciones en las concentraciones de gases de efecto invernadero, basados en modelos climáticos globales y Regionales. La metodología considera métodos estadísticos de reducción de escala, como por ejemplo el factor de cambio (CF), el modelo estadístico de reducción de escala (SDSM) y el generador meteorológico Long Ashton Research Station (LARS-WG) y luego se usan en un método de desagregación para actualizar las curvas IDF.

En este contexto se vuelve importante el planteo de una nueva metodología adecuada para la Provincia de Córdoba que permita la actualización de las IDF en función de la información disponible y del estado del arte local en el diseño de estructuras de drenaje.

CONCLUSIONES

Las metodologías actualmente utilizadas en la provincia de Córdoba para el cálculo de parámetros de diseño de infraestructuras, la planificación del uso de los recursos hídricos, etc. deben ser revisadas de manera urgente.

Una gran parte de las pérdidas y daños a la población que ello ocasiona podría evitarse en el futuro, si la infraestructura que lo requiriera fuese modificada para ajustarla a las nuevas

condiciones hidrometeorológicas; y las nuevas construcciones se hicieran de acuerdo a criterios que contemplen la nueva y futura realidad climática.

A pesar de esta necesidad, no hay aún una metodología totalmente desarrollada y segura para estimar el clima futuro.

El gran desafío durante los próximos años será desarrollar métodos que permitan anticipar el cambio climático en curso e incorporar estos avances en el diseño de las obras y en la planificación y permitan definir las medidas de adaptación necesaria para asegurar el progreso de las comunidades.

La Provincia de Córdoba necesita definir una nueva metodología a seguir para el diseño de las obras de protección y drenaje frente a inundaciones en función del nivel de riesgo que genere la falla de la obra.

Esta tarea involucra establecer primero escenarios de emisión de gases invernaderos a considerar en los diseños, actualización de las curvas IDF y en las condiciones antecedentes que se establecen para las modelaciones.

REFERENCIAS

Acevedo Aristizabal, L. y Boveda Jaramillo, (2011) Construcción y Análisis de cruvas de intensidad-frecuencia-duración (IDF), bajo escenarios de cambio climático en Colombia. Revista Colombia Amazónica.

Archivo Greenpeace: http://archivo-es.greenpeace.org/espana/es/Trabajamos-en/Bosques/Incendios-forestales-en-Espana/Incendios-forestales-y-cambio-climatico/

Birkmann, J., y von Teichman, K. (2009). Addressing the challenge: Recommendations and quality criteria for linking disaster risk reduction and adaptation to climate change (Birkmann, Jörn; Tetzlaff, Gerd; Zentel, Karl-Otto ed.). Bonn: DKKV Publications Series 38.

Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera (CIMA-CONICET) (2007). "B-9 Modelos Climáticos Regionales" *Segunda Comunicación Nacional sobre Cambio Climático*. GEF BIRF PF 51286 AR.

Harvard E. O. Wilson 1993

Intergovernmental Panel on Climate Change (2014). "Climate change 2014 Synthesis report: Summary for policymakers".

Intergovernmental Panel on Climate Change (2000). IPCC *Special Report Emissions Scenarios. Summary for Policymakers*.

Mesa, O. J. (2006) ¿A dónde va a caer este Globo?. *Medellín: Universidad Nacional de Colombia*.

Milly, P C D, Betancourt, Julio L, Falkenmark, Malin, Hirsch, Robert M, Kundzewicz, Zbigniew W, Lettenmaier, Dennis P, and Stouffer, Ronald J, (2008), Stationarity Is Dead: Whither Water Management: Science, v. 319, p. 573-574.

Organización de las Naciones Unidas (2015). Objetivos de Desarrollo del Milenio. Informe de 2015. Naciones Unidas. Estados Unidos.

Pelling, M.(2003): The vulnerability of cities. Natural disaster and social resilience, *Earthscan Publications Ltd.*, Londres.

Radio Canal (San Francisco): http://www.radiocanal.com.ar/noticia/proyecto-relampago-un-cazador-de-tormentas-que-llegara-a-nuestra-provincia-94500)

Rasmussen y otros (2014),

Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación (2015). *Tercera Comunicación Nacional de la República Argentina a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*.

The World Bank. (2008). Climate resilient cities: Primer - Reducing vulnerabilities to climate change impacts and strengthening disaster risk management in Asian cities. Washington, DC: World Bank and United Nations Office for Disaster Risk Reduction – Regional Office for Asia and Pacific (UNISDR AP).

UNISDR. (2015). Sendai framework for disaster risk reduction 2015 - 2030. Artículo presentado en el III UN World Conference en Sendai. Sendai, Japón.

Wamsler, C (2014). Cities, Disaster Risk and Adaptation, *Routledge Series on Critical Introduction to Urbanism and the City,* Routledge, Londres, 352 pag.

Watt E., Marsalek J. (2013). "Critical review of the evolution of the design storm event concept". *Canadian Journal of Civil Engineering, 2013*, 40(2): 105-113, https://doi.org/10.1139/cjce-2011-0594.

IAHR **AIIH**

XXVIII CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA
BUENOS AIRES, ARGENTINA, SEPTIEMBRE DE 2018

APROVEITAMENTO DE ÁGUAS PLUVIAIS – ESTUDO DE CASO NA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE

Rafaella Fonseca da Costa, Bruma Morganna Mendonça de Souza, Ana Cláudia Araújo Fernandes, Micheline Damião Dias Moreira, Ada Cristina Scudelari e Isabelly Bezerra Braga Gomes de Medeiros

Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Brasil, rafaellafonsecac@gmail.com
Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Brasil, bmorganna@gmail.com
Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Brasil, anaclaudia_af@hotmail.com
Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Brasil, michelineddm@hotmail.com
Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Brasil, adaufrn@hotmail.com
Instituto Federal do Rio Grande do Norte, Brasil, isabellybezerra@yahoo.com.br

RESUMO:

Diante da insegurança hídrica global, o aproveitamento de águas pluviais para fins não potáveis apresenta-se como uma solução sustentável para minimizar o problema da escassez de água, de modo a racionalizar e reutilizar este recurso natural. Estudos defendem que, quando descartado o milímetro inicial de precipitação, a água de chuva apresenta qualidade satisfatória para usos não nobres, a exemplo de lavagens de pisos e carros, sistemas de proteção e combate a incêndio, irrigação e fins industriais. Desta forma, este trabalho trata-se de um estudo de caso realizado na Universidade Federal do Rio Grande do Norte, localizada em uma cidade do nordeste brasileiro, que consistiu em um estudo de viabilidade da implantação de um sistema de aproveitamento de águas pluviais no Centro de Tecnologia, para uso em irrigação e lavagens de piso. Concluiu-se que o sistema proposto e dimensionado é passível de utilização, e que a economia de recursos financeiros após esta medida se tornaria benéfica à comunidade acadêmica envolvida.

ABSTRACT:

The use of rainwater for non potable uses, due to the global hydric crisis, consists of a sustainable solution to minimize water shortage by rationalizing and reutilizing this natural resource. Studies defend that, when the first millimeter of precipitation is discarded, rainwater presents a satisfactory quality for non noble uses, as floor and car washings, protection and fire fighting systems, irrigation and industrial ends. This work presents a case study on the Federal University of Rio Grande do Norte, located in a city of the Brazilian Northeast, which consisted of a viability study with the aim of utilizing rainwater in the Technology Center, for irrigation and floor washing purposes. It was concluded that the proposed system is viable and the economy of financial resources after this initiative would be beneficial to the involved academic community.

PALAVRAS-CHAVE: reúso; águas pluviais; sustentabilidade.

INTRODUÇÃO

A crise hídrica, comumente encontrada em diversas regiões brasileiras, é decorrente de múltiplos fatores como o crescimento populacional, a expansão não planejada das cidades e o uso inadequado da água. Aliado a isto, constata-se a deficiência da gestão integrada de água e esgoto quanto à fiscalização da poluição dos mananciais, tanto de forma direta quanto indireta. O problema se agrava em virtude das mudanças e fenômenos climáticos (Hagemann, 2009), a exemplo das altas taxas de evapotranspiração, sobretudo em regiões mais áridas.

De acordo com Fernandes, Moreira e Araújo (2016), embora o uso de cisternas para a captação e armazenamento de águas pluviais seja uma prática antiga no Brasil e no mundo, a sua coleta e imediato uso para fins diversos ainda é incipiente. Segundo Andrade Neto (2013), o potencial do uso desta água, que está presente na atmosfera e condensada nas nuvens, como manancial de boa qualidade, tem sido desprezado em cidades de médio e grande porte. Dentre os usos possíveis, o autor supracitado destaca as lavagens de carros e pisos, os sistemas de proteção e combate a incêndio, os fins industriais e a irrigação.

Nesse contexto, diversos autores relataram redução significativa do consumo de água potável devido à utilização da água de chuva para fins não potáveis. Simioni, Ghisi e Gómez (2004) realizaram um estudo em dois postos de gasolina em Florianópolis e Concórdia, cidades brasileiras do Estado de Santa Catarina, onde a utilização de água da chuva para lavagem de carros resultou em economia de água potável de 84% e 79%, respectivamente. Marinoski e Ghisi (2008) identificaram uma economia de 45,8% de água potável através da sua substituição por água pluvial em uma instituição de ensino localizada em Florianópolis. Proença (2007) realizou estudos em 10 edifícios comerciais localizados no estado de Santa Catarina e verificou que o consumo de água para fins não potáveis chegava a 86% em alguns deles, o que indica um grande potencial de redução no consumo de água tratada. Além disso, Ghisi (2005) avaliou o potencial de economia de água potável no Brasil pelo uso de água de chuva e identificou um potencial médio das regiões do país equivalente a 73%.

Entretanto, ressalta-se que para garantir que o aproveitamento de águas pluviais para fins não potáveis consista em uma solução sustentável, é preciso realizar estudos acerca da viabilidade e eficiência no atendimento dos usos a que a água pluvial será destinada. Assim, evita-se a implantação de projetos inadequados que comprometam os aspectos positivos desta alternativa (Cohim e Kiperstok, 2008). Este trabalho, então, objetivou realizar um estudo de caso na Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Campus Natal, para analisar a viabilidade da implantação de um sistema de aproveitamento de água de chuva no prédio do Centro de Tecnologia, com a finalidade de reduzir o consumo de água fornecida pela Companhia de Águas e Esgotos do Rio Grande do Norte (CAERN) à universidade.

REVISÃO DA LITERATURA

QUALIDADE DA ÁGUA DA CHUVA

Melo e Andrade Neto (2007) defendem que o primeiro milímetro de precipitação geralmente é o suficiente para carrear partículas e microrganismos existentes na atmosfera e na superfície de captação. Em pesquisa realizada pelos autores em Natal, capital do estado do Rio Grande do Norte (Brasil), foi realizada uma avaliação da variação da qualidade da água de chuva através da coleta direta, sem passar por superfície de captação, de amostras distintas e sequenciais dos 10 primeiros milímetros de chuva. Dos três pontos da cidade analisados na pesquisa, percebeu-se que, à exceção da área de menor poluição atmosférica, onde a água já apresentava poucos contaminantes, ocorreu uma significativa redução dos parâmetros de turbidez e condutividade elétrica após o primeiro milímetro de todas as precipitações analisadas. É relevante destacar que o ponto de menor poluição atmosférica estudado pelos autores é a Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), área de estudo do presente trabalho.

Ainda na cidade de Natal, Pinheiro e Araújo (2015) realizaram uma pesquisa no Instituto Federal do Rio Grande do Norte (IFRN), com o objetivo de estudar a qualidade da água de chuva quanto aos parâmetros físico-químicos e microbiológicos. Os autores coletaram os cinco primeiros milímetros de chuva em tubos de policloreto de vinila (PVC), os quais estavam conectados à calha coletora situada no telhado e, com isso, obtiveram os dados fornecidos na Tabela 1. A partir destes resultados, observa-se que, de forma geral, a água apresenta qualidade satisfatória a partir do segundo milímetro de chuva com relação aos limites permissíveis dos parâmetros físico-químicos, para fins de potabilidade. Quanto à análise de microrganismos patogênicos, a Portaria Brasileira 2914/2011 do Ministério da Saúde define que os coliformes totais e *E. coli* não devem estar presentes nas amostras, o que não ocorreu no estudo em questão visto que ambos os parâmetros apresentaram resultados positivos ao longo dos cinco milímetros de chuva. Todavia, os autores afirmam que, a partir do segundo milímetro, esta água poderá ser utilizada para fins não potáveis de usos não restritivos.

Tabela 1.- Avaliação da qualidade da água de chuva ao longo da precipitação

Parâmetros	Limites permissíveis	Média da precipitação				
		1mm	2mm	3mm	4mm	5mm
Condutividade (µA/cm)	ND	111,4	84,1	74,2	68,8	64,8
STD (mg/L)	1000	54,8	41,6	36,8	34,2	32,1
pH	6,0 - 9,5	7,1	7,1	7,2	7,2	7,1
Cloreto (mg/L)	250	1,5	0,9	0,2	0,1	0,0
Cor (uH)	15	17,8	8,1	8,9	8,2	8,9
Turbidez (uT)	5	13,8	2,9	3,6	2,9	2,7
Alcalinidade (mgCaCO3/L)	ND	47,3	36,0	33,3	32,7	30,0
Coliformes totais	Ausência	Presente	Presente	Presente	Presente	Presente
E. coli	Ausência	Presente	Presente	Presente	Presente	Presente

Fonte: Adaptado de Pinheiro e Araújo (2015).

Percebe-se então que o projeto adequado para o sistema de aproveitamento de água de chuva deve incluir como barreiras físicas de proteção sanitária: dispositivo para desviar automaticamente os primeiros milímetros de cada chuva; cobertura da cisterna que impeça a entrada de insetos e luz; extravasor e ventilação para propiciar a reoxigenação da água; e retirada de água por tubulação (Andrade Neto, 2004). Assim, quando planejada, projetada e gerenciada corretamente, a coleta de água de chuva se tornará uma valiosa fonte alternativa e sustentável de água para enfrentar o estresse hídrico vivenciado em todo o mundo (Kaposztasova et al., 2014).

DADOS PLUVIOMÉTRICOS

Os dados mensais de pluviosidade e temperatura foram obtidos pela Empresa de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Norte (2015) e correspondem ao período compreendido entre os anos de 1994 e 2014, na Estação Climatológica Principal da UFRN. Conforme a Tabela 2, tem-se uma precipitação acumulada anual média de 1.867,9 mm. Além disso, observa-se que o mês que apresenta o maior valor de precipitação acumulada mensal média é o mês de junho, correspondendo a 408,6mm. Durante os meses de outubro a dezembro, foram observados os menores índices pluviométricos mensais (< 26 mm). No entanto, ressalta-se que as precipitações pluviométricas na cidade ocorrem durante o ano inteiro.

Tabela 2.- Precipitações pluviométricas em Natal/RN, no período de 1994 a 2014

Ano	Precipitação acumulada anual (mm)	Precipitações pluviométricas médias mensais (mm)											
		JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
1994	2184,3	94,5	86,2	237,0	275,7	279,7	624,9	399,6	84,6	57,3	4,5	20,4	19,9
1995	1757,9	24,6	60,6	278,0	237,4	392,3	254,4	408,3	34,8	21,6	4,2	41,3	0,4
1996	1587,0	37,0	69,7	216,2	359,5	154,6	251,4	145,8	125,4	86,7	78,4	45,1	17,2
1997	1187,3	13,3	72,8	159,6	256,2	340,0	77,7	79,8	121,3	5,1	3,0	2,7	55,8
1998	1641,2	49,2	78,3	81,4	74,7	161,7	210,0	789,0	138,7	19,0	13,7	8,5	17,0
1999	1111,2	12,6	143,8	139,2	175,8	289,5	131,5	31,1	49,8	51,1	14,5	5,4	66,9
2000	2239,4	40,0	79,9	114,9	177,4	230,0	577,2	482,3	288,8	205,1	8,7	12,1	23,0
2001	1276,5	30,1	6,8	133,8	360,2	14,4	373,4	145,2	103,2	28,4	13,7	17,1	50,2
2002	2026,7	108,9	82,3	483,1	137,7	122,9	405,6	225,2	312,9	1,0	29,4	98,9	18,8
2003	1523,6	84,1	184,0	312,0	133,4	230,8	244,3	183,5	49,6	41,6	21,7	16,1	22,5
2004	2446,1	383,9	283,0	252,0	167,8	160,7	642,9	393,4	90,1	44,4	13,0	10,1	4,8
2005	2026,7	2,0	36,4	186,3	144,0	548,3	761,0	126,9	134,4	43,9	31,6	1,2	10,4
2006	1582,5	4,2	87,2	157,4	427,9	115,3	375,1	133,3	90,2	45,2	13,4	83,5	49,8
2007	1754,4	86,3	65,9	260,3	245,4	120,9	560,4	191,8	95,8	46,2	20,2	45,2	16,0
2008	2475,6	69,4	22,4	270,9	409,2	212,0	538,0	473,1	401,1	37,8	31,8	9,5	0,4
2009	2340,5	162,1	245,7	220,6	364,3	372,3	304,5	347,9	229,2	76,7	1,0	6,7	9,5
2010	1192,4	71,3	81,4	69,9	191,0	262,7	153,9	150,5	95,3	40,3	8,2	13,2	54,7
2011	2162,5	326,1	76,5	146,7	368,3	413,0	445,4	170,4	118,0	33,3	20,8	44,0	0,0
2012	1242,0	76,5	110,7	148,2	60,7	184,3	302,1	234,9	63,4	40,7	18,4	0,7	1,4
2013	1846,7	20,2	59,8	35,1	177,6	254,9	399,1	430,6	242,0	200,0	11,1	6,5	9,8
2014	1753,8	79,0	52,1	262,1	81,9	191,0	538,5	231,1	89,7	149,0	30,7	24,8	23,9
MÉDIA	1867,9	88,8	99,3	208,2	241,3	252,6	408,6	288,7	147,9	63,7	19,6	25,7	23,6
MÁXIMA	2475,6	1775	1986	4165	4826	5051	8171	5774	2959	1274	392	513	472
MÍNIMA	1111	2,0	6,8	35,1	60,7	14,4	77,7	31,1	34,8	1,0	1,0	0,7	0,0

Fonte: Adaptado de Empresa de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Norte (2015).

DEMANDA DE ÁGUA PARA IRRIGAÇÃO E LIMPEZA

A vegetação ao redor do Centro de Tecnologia da UFRN é constituída de grama e de áreas de vegetação escassa (Figura 1), e sua irrigação ocorre através de mangueiras perfuradas. Para obter a área de irrigação deste local, Rocha (2017) considerou as áreas de grama em sua totalidade e 10% da área de vegetação escassa, uma vez que são regadas com baixa ou nenhuma frequência no local. Por meio do projeto legal da edificação e com o auxílio de trena, obteve-se a área total de irrigação calculada em 1.140,84 m².

Para obter a taxa de irrigação em L/m², o autor supracitado realizou uma pesquisa com os funcionários que trabalham com a limpeza da edificação, que informaram um tempo de irrigação médio de 12,5 minutos, com frequência de irrigação diária (5 dias/semana). Ainda segundo o autor, o espaçamento entre os furos da mangueira utilizada para irrigação é de 30 cm e a pressão de trabalho, por ela adotada, foi de 5 mca. Obteve-se então o raio de atuação de 1,25m e uma vazão por metro de mangueira igual a 10,54L/hora.metro, por meio de consulta ao fabricante (Santeno, 2014), que resultaram em uma área de 2,50m² atingida por cada metro de mangueira. A taxa de irrigação local adotada foi de 0,88 L/m², valor admissível em comparação ao proposto na literatura por Macintyre (2010), que indica a taxa de 1,5 L/m² de água para a irrigação de jardim. Ao considerar a taxa de irrigação encontrada e adotada por Rocha (2017), a demanda para irrigação do CT é de 1.003,94 litros diários, e considera as condições previamente estabelecidas de cinco dias por semana, cujos consumos semanal e mensal resultaram em 5.019,70L e 20.078,78L.

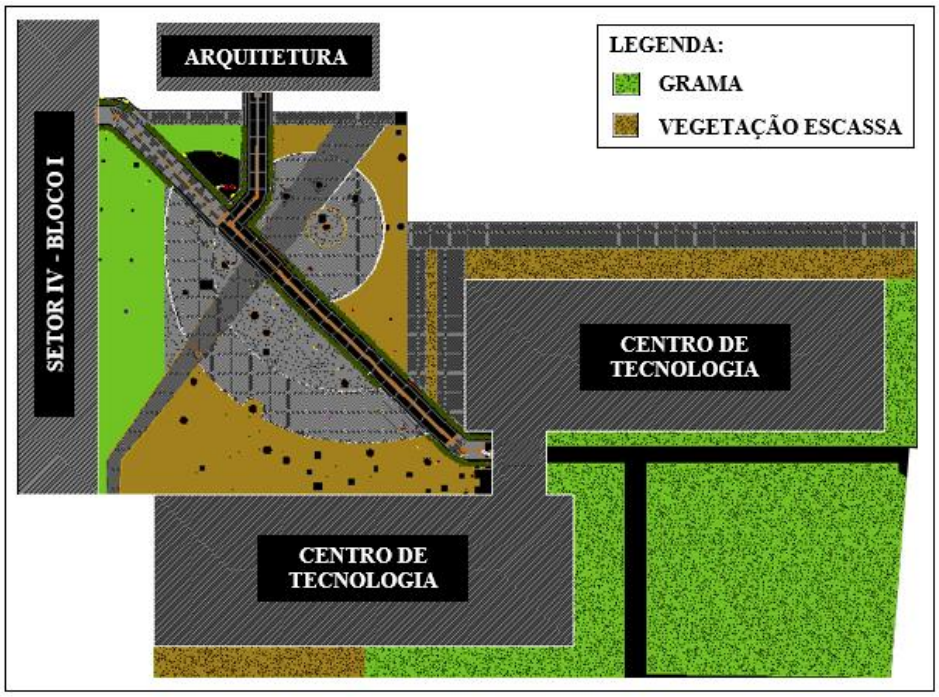


Figura 1.- Áreas de irrigação. Fonte: Adaptado de Rocha (2017).

No que é referente à limpeza dos corredores e salas da edificação de estudo, Pimenta (2016) obteve, em sua pesquisa, um consumo médio diário de água de 213 litros e médio mensal de 4.260 litros. Os valores informados na entrevista são apresentados na Tabela 3 e indicam uma demanda total de 24.338,78 litros.

Tabela 3.- Uso de agua para limpeza no Centro de Tecnologia (UFRN)

Limpeza				
		Térreo [l]	**1º andar** [l]	**Total** [l]
Segunda-feira	Banheiros	120	120	240
	Corredores e salas	20	30	50
Terça-feira	Banheiros	80	80	160
	Corredores e salas	20	50	70
Quarta-feira	Banheiros	60	60	120
	Corredores e salas	20	30	50
Quinta-feira	Banheiros	65	80	145
	Corredores e salas	20	50	70
Sexta-feira	Banheiros	60	60	120
	Corredores e salas	20	20	40

Fonte: Adaptado de Pimenta (2016).

METODOLOGIA

ÁREA DE ESTUDO

Esta pesquisa foi desenvolvida no Centro de Tecnologia (CT) do Campus Central da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), localizada no município de Natal, capital do estado do Rio Grande do Norte, Brasil. O CT (Figura 2) está localizado próximo ao Setor de aulas IV, onde ocorrem a maioria das aulas dos cursos de Engenharia, e também próximo aos laboratórios do Departamento de Arquitetura; nele, estão localizadas as coordenações, secretarias e

chefias de cursos da área tecnológica, bem como salas de professores, auditório, depósitos, almoxarifado e laboratórios.

Figura 2.- Localização da área de estudo: (a) Natal/RN; (b) UFRN; e (c) Centro de Tecnologia e Departamento de Arquitetura. Fonte: Adaptado de Rocha (2017).

ESTUDO DE CASO

O trabalho concentrou-se na análise da viabilidade do uso da água de chuva coletada pelo sistema de água pluviais do CT, para ser aproveitada na irrigação paisagística do entorno, bem como no uso para lavagens de piso. A cobertura do prédio, conforme verificado em projeto, possui uma área de projeção horizontal de 1.390 m², e é composta por telhas de fibrocimento que desaguam em calhas. A água de chuva é conduzida através de calhas, condutores verticais, condutores horizontais e caixas de areia, respectivamente.

A partir de informações obtidas na literatura a respeito do tipo de irrigação, sua frequência semanal e horários, além da demanda de limpeza na área de estudo, realizou-se o projeto de implantação do sistema com base nas recomendações das normas brasileiras NBR 15527:2007 (Água de chuva - Aproveitamento de coberturas em áreas urbanas para fins não-potáveis - Requisitos), NBR 10844:1989 (Instalações prediais de águas pluviais - Procedimento) e NBR 5626:1998 (Instalação predial de água fria). Por fim, foi realizada uma análise de viabilidade econômica para a implantação do sistema, destacando aspectos como o período de retorno de investimento.

DIMENSIONAMENTO DO RESERVATÓRIO

Conforme destacado anteriormente, a fundamentação dos cálculos de dimensionamento de reservatórios deste trabalho segue os padrões da norma brasileira NBR 15527 (ABNT, 2007). Assim, para a estimativa do volume dos reservatórios foram utilizados os métodos de Rippl, da Simulação, de Azevedo Neto, Prático Alemão, Prático Inglês e Prático Australiano. Ainda de acordo com esta norma, este parâmetro depende diretamente dos dados mensais de precipitação, da área de coleta e do escoamento da cobertura. Além do volume aproveitável, a demanda requerida para irrigação paisagística e limpeza estimada por Pimenta (2016) também consistiram em dados fundamentais ao dimensionamento do reservatório e, portanto, foi considerado neste estudo um consumo mensal de 24.338,78 litros.

PROJETO LEGAL

Após escoar através de caixas de inspeção, as águas pluviais captadas são direcionadas para uma caixa de distribuição geral; nesta, há uma grade que detém impurezas de maior dimensão, a exemplo de folhas e outros sólidos de dimensão considerável. A posteriori, conduz-se a água até o reservatório de descarte do primeiro milímetro de precipitação que, segundo Andrade Neto (2013) é tido como impróprio para uso. Recomenda-se que este sistema de descarte seja automático, e o volume não aproveitável de água seja lançado em galerias de águas pluviais, na via pública ou em terreno onde a infiltração, total ou parcial, não acarrete no risco de contaminação do lençol freático (ABNT, 2007). O restante da água, passível de utilização, é convergido para os reservatórios de armazenamento, que devem apresentar dispositivo extravasor para direcionar a água em excesso a um poço absorvente. Para o dimensionamento do reservatório, de acordo com parâmetros estabelecidos por Rocha (2017), adotou-se vazão de irrigação de jardim igual a 0,88 L/m²/dia e estimou-se que o conjunto motor-bomba estará ligado durante uma hora por dia, dividida entre intervalos de trinta minutos. Em virtude da facilidade do escoamento por gravidade, admitiu-se que o reservatório será disposto de modo enterrado, e que este será usualmente abastecido inteiramente por águas pluviais. Além do extravasor, a ABNT NBR 15527:2007 determina que o reservatório deve ser dotado de dispositivos de esgotamento, cobertura, inspeção, ventilação e segurança, de modo a proteger a água captada da luz solar, do calor, e de agentes intrusos. Ainda segundo a mesma norma, este sistema deve atuar de modo independente ao sistema de água potável.

LEVANTAMENTO DE CUSTOS

O cálculo do período de retorno do investimento, após o dimensionamento do reservatório, é realizado por meio de um estudo de custo de implementação do sistema. Para isto, foi realizado um orçamento básico com o auxílio de sistemas oficiais de referências de custo; para este trabalho foi adotado como como referência o Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil (SINAPI) da Caixa Econômica Federal (CEF), cujos preços foram considerados para o estado do Rio Grande do Norte e a data-base utilizada foi a referente ao mês de março de 2018. No caso dos serviços inexistentes em referências oficiais, foram consideradas cotações junto a fornecedores de reservatórios de polietileno, fibra de vidro e aço carbono. Assim, como estimado por Fernandes, Moreira e Araújo (2016), os custos considerados compõem os serviços e materiais necessários à implementação do sistema: conjuntos motor-bomba, válvulas de pé com crivo, tubulações, válvulas de retenção, registros de gaveta, caixas de distribuição, alvenaria de contorno, laje de concreto e bases dos reservatórios.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

RESERVATÓRIOS

O dimensionamento do reservatório com base nos métodos Australiano e de Azevedo Neto divergiram dos demais métodos de forma expressiva. O método prático Australiano utiliza uma análise entre a chuva total do mês, relacionando-a com a demanda também mensal para resultar no volume da cisterna. Assim, observou-se que seu resultado diferencia-se dos métodos práticos por obter valores mais criteriosos e, por desconsiderar que não há demanda para toda a água passível de ser captada, resultando em um reservatório superestimado. Pelo método de Azevedo Neto, também houve superdimensionamento ao compará-lo com os outros métodos do volume do reservatório, conforme ilustrado na Figura 3. Acredita-se que isto deve-se ao fato de que este método relaciona a capacidade de armazenamento do reservatório com a quantidade de meses com seca ou pouca chuva, variável que não é utilizada pelos demais métodos indicados na norma NBR 15527 (ABNT, 2007). Além disso, em contrapartida ao método de Azevedo Neto, Andrade Neto (2013) defende que nem sempre o mais adequado, do ponto de vista econômico e energético, é reservar água em

grandes reservatórios para consumo nos períodos secos, mas, sim, utilizar reservatórios menores para captação e regularização em períodos chuvosos a fim de garantir a economia de energia, bem como de outras fontes de água disponíveis, mas de custo mais alto nesses períodos.

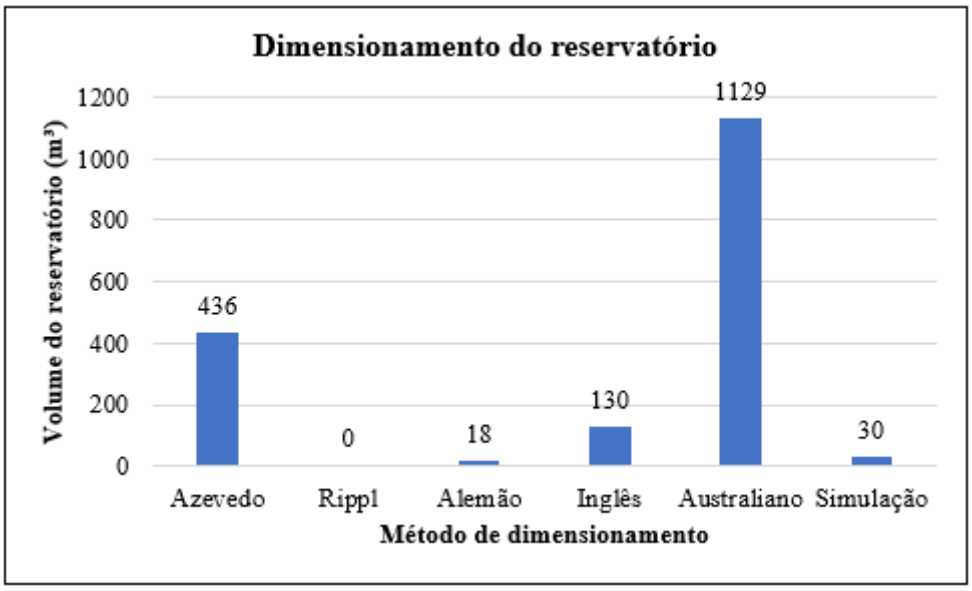


Figura 3.-Volume de reservatorio obtido para os diferentes métodos de dimensionamento propostos pela NBR 15527 (ABNT, 2007). Fonte: Autores (2018).

O método Prático Inglês é um dos mais simples a ser aplicado, e requer apenas os valores de precipitação anual e da área de captação. Portanto, observou-se que quanto maior for a precipitação maior será o volume do reservatório, desconsiderando a demanda. Desta maneira, ainda que para o método inglês tenha sido observado um reservatório com volume bem inferior aos dos métodos Australiano e de Azevedo Neto, este ainda resultou em um superdimensionamento do reservatório chegando a aumentar mais de 100% o volume quando comparado aos resultados obtidos pelos métodos da Simulação e Alemão. Optou-se, então, por desconsiderar os métodos Inglês, Australiano e Azevedo Neto para o projeto em análise.

Segundo as características de consumo consideradas, o método de Rippl, utilizando dados mensais, não se aplica pois, este se baseia no balanço entre disponibilidade e demanda, acumulando água no período de chuva para utilizar durante a estiagem. Assim, tendo em vista que em apenas um mês o volume captado é inferior à demanda considerada, a utilização do método de Rippl torna-se inviável neste projeto.

O Método Prático Alemão considera o volume da cisterna igual a 6% do menor valor entre a demanda anual e o volume total de água de chuva aproveitável. Sendo assim, este método considera apenas os valores de água pluvial anual ou a da demanda anual de água pluvial, desconsiderando a área de captação. Dessa forma, além de resultar em um volume inferior à demanda mensal, não foram encontradas quaisquer justificativas técnicas que esclareçam a adoção desta porcentagem na definição do volume da cisterna; portanto, o método Prático Alemão não apresenta um procedimento de cálculo confiável, sendo apenas uma mera estimativa do volume.

O método da Simulação resulta num valor do reservatório de água pluvial baseado no fator pluviométrico, observando-se os meses que em que houve déficit de chuva e resultando em tamanhos ideais para armazenamento da água de chuvas para os meses em que há pouca chuva. Logo, o método da simulação foi o adotado para a determinação efetiva do volume dos reservatórios, uma vez que foi o mais próximo da realidade. O método da simulação faz o balanço hídrico a partir de volumes pré-definidos de reservatórios, que podem ser escolhidos pelo usuário ou sugeridos pelo modelo (Cohim et al, 2008). Tendo em vista que a pesquisa realizada por Pimenta (2016) verificou que a demanda de irrigação é constante (5 vezes por semana), isto é, a universidade não muda a frequência de irrigação em períodos chuvosos, foi considerado o método da simulação

de demanda constante. Com isso, para uma demanda constante de 24m³ e objetivando apresentar um reservatório com volume superior à demanda mensal, observou-se que dois reservatórios de 15m³ (Figura 4) atenderiam à demanda de irrigação e lavagem de piso do CT de modo que não seria necessário suprimento em nenhum mês e haveria *overflow* em todos.

A fim de obter uma margem de segurança com relação ao exposto na literatura (descarte do primeiro milímetro) e tendo em vista que a disponibilidade de água da chuva com relação à demanda permite esta consideração, foi contemplado em projeto o descarte dos primeiros 1,5mm de precipitação. Desta forma, como a área de captação em estudo possui 1.390m², estima-se que o volume do reservatório de descarte dos primeiros 1,5 mm de chuva seja de 2.085 L. Todavia, por questões comerciais, adotou-se um reservatório de descarte de 2.000 L.

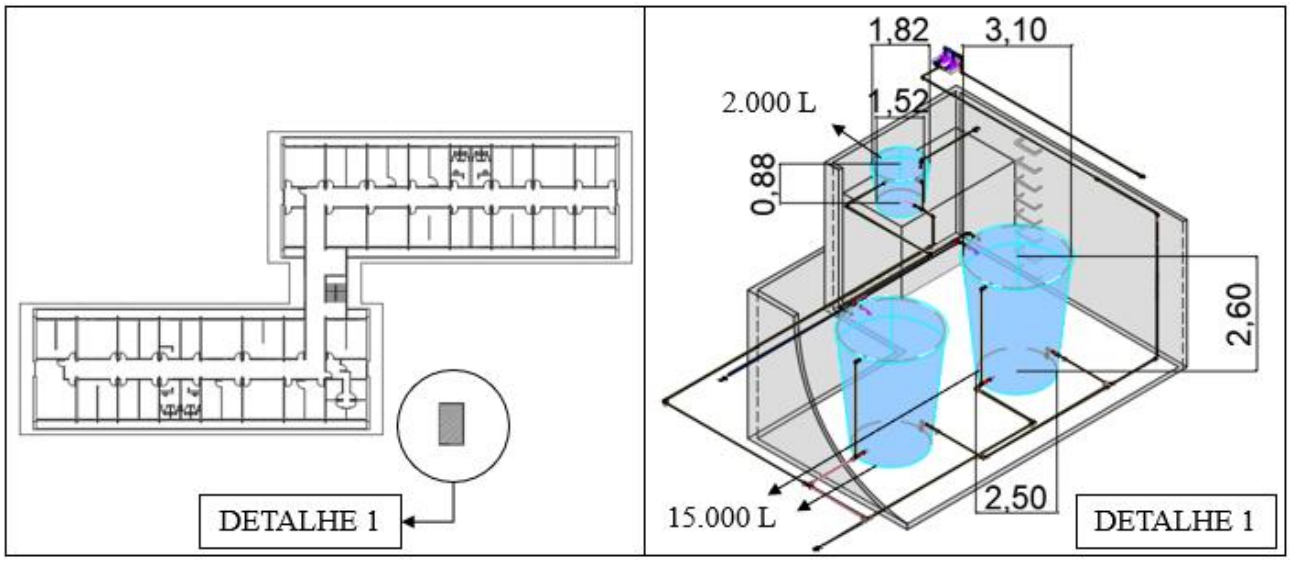


Figura 4.- Posicionamento dos reservatórios (2.000L e 15.000L) na área de estudo e seu respectivo detalhe. Fonte: Autores (2018).

A eficiência do sistema para cada volume de reservatório adotado pode ser calculada pela razão entre o número de meses em que a demanda foi totalmente atendida e o número de meses utilizado na simulação. Dessa forma, a utilização de dois reservatórios de 15m³ permite uma eficiência de 100% à medida que a demanda é atendida em todos os meses do ano.

VIABILIDADE DA IMPLANTAÇÃO DO SISTEMA DE APROVEITAMENTO DE ÁGUAS PLUVIAIS

Os itens de maior relevância do orçamento foram os reservatórios, conjuntos hidráulicos motor bomba, alvenaria de contorno do reservatório, laje em concreto e as bases dos reservatórios. Além disso, a mão de obra também se constituiu num peso significativo no valor final da construção. O levantamento do custo total da obra foi fundamental para determinar o *payback*, que está diretamente associado ao retorno do custo em relação ao benefício em meses, ou seja, o tempo de retorno do investimento inicial até o momento em que os rendimentos acumulados se igualam ao valor do investimento.

A significativa redução de 100% referente ao custo mensal com a demanda de irrigação da edificação e de lavagem de pisos, bem como o *payback* de 1,9 anos, são indicativos da eficiência da aplicação do sistema. Ressalta-se ainda que além da economia financeira proporcionada por este sistema, o mesmo também permite a inserção de empresas públicas e privadas no cenário sustentável, haja vista que permite a redução da extrema dependência dos recursos superficiais e subterrâneos, bem como a aplicação da responsabilidade ambiental de boas práticas de conscientização da conservação da água. O levantamento de materiais e mão de obra resultou em um custo total da obra para implantação do sistema de R$ 26.713,41. Dessa forma, percebe-se que o

projeto apresenta uma solução simples e de baixo custo que possibilita grande benefício na economia do consumo de água assim como promove a preservação deste importante recurso natural.

Tabela 4.- *Payback* do sistema de aproveitamento da agua de chuva

Informações sobre o sistema dimensionado	
Capacidade do reservatório [m³]	50,00
Custo anual sem o aproveitamento de chuva [R$]	14333,76
Custo de implantação do sistema [R$]	26713,41
Custo anual com o aproveitamento da água de chuva [R$]	0,00
Redução de custo anual com a implantação do sistema [R$]	14333,76
Percentual de redução de custo anual com a implantação do sistema	100,00%
Período de retorno de investimento [anos]	1,90

Fonte: Autores (2018).

CONCLUSÕES

O estudo de caso apresentado neste artigo mostrou que o investimento em sistemas de aproveitamento da água de chuva para fins não potáveis, a exemplo da irrigação, é uma alternativa viável diante do contexto da escassez hídrica e da adversidade das condições de abastecimento de água à população urbana no Brasil.

Os resultados obtidos foram bastante satisfatórios, uma vez que possibilitam adequar a qualidade da água de fontes alternativas para usos menos restritivos das edificações de modo comprometido com ações sustentáveis. Quantos aos resultados dos custos referentes à implantação do sistema, estes identificaram uma significativa economia financeira de água potável, calculada com base nas considerações e critérios do projeto de aproveitamento de água de chuva elaborado para o Centro de Tecnologia. Além disso, o rápido *payback*, caracterizado por um período de retorno de 1,9 anos é notoriamente satisfatório.

Observou-se ainda que o potencial de aproveitamento da água de chuva é bem maior do que a demanda de irrigação e lavagem de piso do CT, o que indica a importância de ampliar o estudo para outros fins não potáveis bem como realizá-lo em outros prédios da UFRN. Assim, confirmando a viabilidade econômica e construtiva, os objetivos propostos inicialmente com a implantação do sistema de aproveitamento de água da chuva não somente foram alcançados como apresentaram potencial de aproveitamento da água de chuva bem maior do que a demanda de irrigação e lavagem de piso do CT, o que indica a importância de ampliar o estudo para outros fins não potáveis, bem como realizá-lo em outros prédios da UFRN.

Além dos benefícios esperados, outro fator de grande relevância é o legado deixado para a comunidade acadêmica, capaz de incentivar o estudo de novas técnicas e aperfeiçoamentos tecnológicos, contribuindo para o desenvolvimento da ciência brasileira conforme os princípios ambientais.

REFERÊNCIAS

Andrade Neto, C. O. de (2004). "Proteção Sanitária das Cisternas Rurais". *In: SIMPÓSIO LUSO-BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL*, v.11, 2004, Natal, Brasil. Anais... Natal: ABES/APESB/APRH, 2004, 7 p. 2.

Andrade Neto, C. O. de (2013). "Aproveitamento imediato da água de chuva". *Revista eletrônica de gestão e tecnologias ambientais*. Bahia, 2013, v.1, n. 1.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2007). *NBR 15527: Água de chuva – aproveitamento de coberturas em áreas urbanas para fins não potáveis – requisitos*. Rio de Janeiro. 8 p. 3.
Associação Brasileira de Normas Técnicas (1989). *NBR 10844: Instalações prediais de águas pluviais*. Rio de Janeiro. 13 p. 4.
Associação Brasileira de Normas Técnicas (1998). *NBR 5626: Instalação predial de água fria*. Rio de Janeiro, 1998. 41 p.
Brasil (2011). Ministério da Saúde. "Portaria nº 2914, de 12/2011". *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*, Poder Executivo, Brasília, DF, 14 dez. 2011. Seção 1, p. 39-46.
Cohim, E.; Kiperstok (2008). "Racionalização e reuso de água intradomiciliar. Produção limpa e ecosaneamento". *In: KIPERSTOK, Asher (Org.) Prata da casa: construindo produção limpa na Bahia*. Salvador, Brasil.
Creder, Hélio (2013). *Instalações hidráulicas e sanitárias*. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013. 423 p.
Ding, G. K. C (2017). "Recycling and Reuse of Rainwater and Stormwater". *Encyclopedia of Sustainable Technologies*, p. 69-76. Australia, Elsevier Ltd: 2017
EMPARN (2015). Empresa de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Norte. *Monitoramento pluviométrico*. Natal: EMPARN, 2015. Disponível em: <http://www.emparn.rn.gov.br>. Acesso em: 20 de maio de 2015.
Fernandes, A.C.A; Moreira, M.D.D; Araújo, A.L.C (2016). "Utilização de águas pluviais: uma alternativa para minimizar a crise hídrica – estudo de caso no Instituto Federal do Rio Grande do Norte". *In: VII Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental*. Campina Grande/PB, Brasil.
Guisi, E. (2005). "Potential for potable water savings by using rainwater in the residential sector of Brazil". *Building and Environment* 41, p. 1544–1550. doi:10.1016/j.buildenv.
Google (2018). *Google Maps*. 2018. Disponível em: <https://www.google.com.br/maps>. Acesso em: 08 de julho de 2018.
Hagemann, S. E. (2009). *Avaliação da qualidade da água da chuva e da viabilidade de sua captação e uso*. 140 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) − Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Maria, 2009.
Marinoski, A. K.; Ghisi, E. (2008). "Aproveitamento de água pluvial para usos não potáveis em instituição de ensino: estudo de caso em Florianópolis – SC", *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 8, n. 2, p. 67-84.
Kaposztasova et al. (2014) "Rainwater Harvesting, Risk Assessment and Utilization in Kosice-city, Slovakia". *Procedia Engineering*, v. 89, p. 1500-1506. Slovakia, Elsevier Ltd: 2014.
Macintyre, A. J. (2010). *Instalações Hidráulicas Prediais e Industriais*. 4. ed. Rio de Janeiro: Ed. LTC - Livros Técnicos e Científicos.
Melo, L. R. C.; Andrade Neto, C. O. (2007). "Variação da qualidade da água de chuva em três pontos distintos da cidade de Natal-RN". *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL*, 24., 2007, Belo Horizonte. Anais... Rio de Janeiro: ABES, 2007.
Pimenta, P. L. (2016). *Análise quantitativa do aproveitamento da água dos aparelhos de ar condicionado do Centro de Tecnologia da UFRN*. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil. Natal, RN.
Pinheiro, L. G.; Araújo, A. L. C. (2015). *Avaliação da qualidade da água de chuva ao longo da precipitação*. 11f. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização) – Curso de Gestão Ambiental, Instituto Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2015.
Proença, L. C. (2007). *Usos finais de água em edifícios de escritórios localizados em Florianópolis*. Relatório de Iniciação Científica. Laboratório de Eficiência Energética em Edificações – LabEEE, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis.
Rocha, D. P. B da (2017). *Sistema de reuso de água proveniente de aparelhos de ar condicionados para fins não potáveis: estudo de caso aplicado ao centro de tecnologia da UFRN*. 18 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2017. Disponível em: <https://monografias.ufrn.br/jspui/bitstream/.../1/sistema-reuso-agua-Rocha-Artigo.pdf>. Acesso em: 27 fev. 2018.
Santeno (2014). *Informações técnicas: sistema de irrigação*. Disponível em: http://kadox.com/. Acesso em: 20 de maio de 2018.
Simioni, W.I.; Ghisi, E.; Gómez, L.A. (2004). "Potencial de economia de água tratada através do aproveitamento de águas pluviais em postos de combustíveis: estudo de caso". *In: Conferência Latino-americana de construção sustentáveis*, São Paulo. ISBN 85-89478-08-4. Disponivel em: <ftp://ip20017719.eng.ufjf.br/Public/AnaisEventosCientificos/ENTAC_2004/trabalhos/PAP0740d.pdf>. Acesso em 22/06/2018.

SINAPI (2018). *Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil*. Natal: IBGE e CAIXA. Disponível em: <http://www.caixa.gov.br/Paginas/home-caixa.aspx>. Acesso em: 18 de maio de 2018.

CARACTERIZACIÓN DEL RIESGO POR INUNDACIÓN EN CULTIVOS UBICADOS EN LLANURAS DE RÍOS DE PLANICIE

Beatriz Edith Vega Serratos[1], Posada Vanegas Gregorio[2], Domínguez Mora Ramón[3]
[1,2] Instituto EPOMEX, Universidad Autónoma de Campeche, Av. Héroe de Nacozari No 480, San Francisco de Campeche, Camp, México
[3] Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria CP 04510, Ciudad de México, México
beaevega@uacam.mx, gposadav@uacam.mx, rdominguezm@iingen.unam.mx

RESUMEN:

Las consecuencias de las inundaciones pueden ser devastadoras, afectando tanto los sectores sociales como económicos de un país o región. El sector agrícola puede sufrir grandes pérdidas por la interrupción de la cadena productiva, reducción de ingresos, desempleo, desabasto, y la capacidad de producción además de generar grandes daños patrimoniales a los productores ya sea por pérdida parcial o total de la inversión y del ingreso esperado. En este trabajo se presenta una metodología que permite evaluar el riesgo por inundación en áreas de uso agrícola. Se consideran de los parámetros de la inundación la duración y la profundidad de la inundación. Se proponen las curvas del impacto de daño en cultivos a partir de datos obtenidos mediante la aplicación de encuestas a personal científico, técnico y agricultores complementadas con información bibliográfica; dichas curvas consideran las distintas etapas del ciclo vegetativo del cultivo, de manera que al relacionarlas con la probabilidad de que una creciente ocurra en cada mes del año es posible calcular el daño anual esperado, para un evento de inundación. La zona de estudio corresponde a la cuenca del río Champotón, en el Estado de Campeche, México, en la cual las inundaciones, al ser lentas, se caracterizan porque la duración es de mayor relevancia que la velocidad de la corriente.

ABSTRACT:

The consequences of floods can be devastating, affecting both the social and economic sectors of a country or region. The agricultural sector can suffer great losses due to the interruption of the productive chain, reduction of income, unemployment, shortage, and production capacity as well as generating great patrimonial damages to the producers, either due to partial or total loss of investment and income expected. This study presents a method that evaluates risk due to flooding in agricultural areas. The method proposed uses a two-dimensional hydrodynamic model to obtain the parameters of the natural hazard, including the depth, duration and velocity of the flood. Damage curves were constructed from data obtained by applying surveys to scientific, technical and farming personnel, supplemented with bibliographic information. These curves consider the various stages of the vegetative crop cycle in such a way that by relating them to the probability estimate of an extreme flow occurring each month of the year it is possible to calculate the expected damage associated with each magnitude of the extreme flows. The study area corresponds to the Champoton River basin in the State of Campeche, Mexico, where floods, which are slow, are characterized by the fact that their relevance plays a more fundamental role than the velocity of the water.

PALABRAS CLAVES: *Riesgo, Inundación, Cultivos*

INTRODUCCIÓN

Las inundaciones son un fenómeno natural que afecta varios aspectos de un país o región y sus efectos devastadores pueden alterar social y económicamente a un país o región. La evaluación económica del impacto de las inundaciones tiene un efecto directo en cada etapa del manejo integral del riesgo por inundación (Dutta et al., 2003).

En el sector agrícola los daños económicos esperados debido a las inundaciones suelen ser considerablemente inferiores a los de las zonas urbanas para el mismo nivel de exposición (Merz et al., 2010). Por lo anterior, aun cuando se han desarrollado varios métodos para estimar las pérdidas monetarias en el sector agrícola, la evaluación de daños en zonas rurales se ha hecho con métodos simples y aproximados (Förster et al., 2008; Merz et al., 2010; Brémond et al., 2013).

Para que una metodología proporcione estimaciones realistas de los daños es muy importante la selección adecuada de los parámetros del riesgo por inundación. Los más utilizados y que tienen mayor influencia en el cálculo de los daños directos son aquellos de tipo genérico y que pueden ser obtenidos a partir de modelos hidráulicos de diversas características. En todo caso, la selección del modelo numérico a utilizar dependerá de factores como la calidad de información disponible y nivel de escala del estudio. Con respecto a los parámetros de inundación que se pueden considerar para la construcción de las funciones de daño directo en la agricultura son la estacionalidad de las inundaciones, profundidad del agua, duración, velocidad de la corriente, depósitos, contaminación ambiental y salinidad del agua (Brémont et al., 2013).

En los métodos de estimación de daños, el desarrollo de las funciones de daño o curvas de daño es esencial e implica un proceso complejo (Smith 1994; Vosinaki et al., 2015). Existen dos tipos de curvas de daños, las históricas que han sido obtenidas de bases de datos de daños de inundaciones pasadas como HOWAS 21 desarrollada en Alemania y por otro lado, las curvas de daño sintéticas, las cuales se basan en análisis hipotéticos de daños esperados bajo ciertas condiciones de inundaciones (Vosinaki et al., 2015). El sector agrícola en México está expuesto a diversos riesgos hidrometeorológicos cuyos efectos negativos, pueden alcanzar dimensiones de catástrofe, derivando en daños patrimoniales a los productores y a la economía familiar, ya sea por pérdida parcial o total de la inversión y del ingreso esperado. De igual forma, pueden generar daños a la economía regional y nacional por la interrupción del ciclo productivo, reducción de los ingresos, desempleo y desabasto de alimentos, entre otros.

El presente trabajo muestra una metodología que permite evaluar el riesgo por inundación en áreas de uso agrícola, toma como base trabajos previos adaptados a las condiciones de la zona de estudio y la información disponible. Este método utiliza un modelo bidimensional para obtener los parámetros de peligro como la profundidad, la duración y la velocidad de la inundación. Las funciones de daño consideran la estacionalidad de la inundación relacionada con el ciclo vegetativo del cultivo. Debido la falta de una base de datos histórica sobre daños en la agricultura, se construyeron curvas de daño por medio de entrevistas aplicadas a personal científico, técnico y agricultores, completadas con información bibliográfica. La zona de estudio corresponde a la cuenca del río Champotón, en el Estado de Campeche, México, en la cual las inundaciones son lentas, por lo que el parámetro de la duración es más importante que la velocidad en las áreas agrícolas.

ÁREA DE ESTUDIO

La metodología propuesta se aplicó en la cuenca del río Champotón, ubicada en la parte central del estado de Campeche (Figura 1). Pertenece a la Región Hidrológica (RH) número 31 Yucatán Oeste, Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2015), cuya superficie total de 649 km^2, con una elevación máxima de 120 msnm. Limita al norte con la RH número 32 Yucatán Norte, al sur con la RH número 30 Grijalva-Usumacinta, al este y oeste con el Golfo de México.

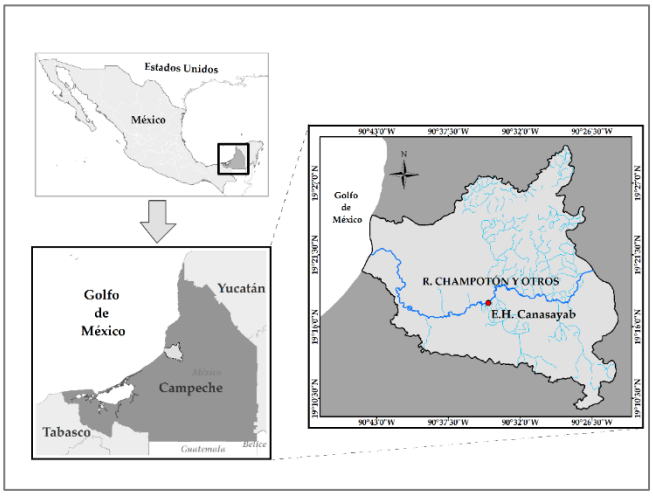


Figura 1.- Zona de estudio

La longitud del río es de 48 km aproximadamente, con origen cerca del poblado de San Juan Carpizo hasta su desembocadura al Golfo de México (Posada et al., 2013). El desarrollo principal del río es sobre una planicie de pendiente suave, con un ancho promedio de 50 m y en la desembocadura un ancho máximo de 80 m, su profundidad media es de 4 m. A lo largo del río se encuentran diversos ojos de agua, corrientes intermitentes, las lagunas de Nayarit de Castellot, conocida localmente como laguna de Nilúm, y la laguna de Noch, así como las aguadas de Xbacab, Chuina y Hool (Ramírez V., 2015). Su trayectoria general es Este-Oeste y es alimentado en forma subterránea por los ríos Desempeño y Las Pozas, los cuales nacen en la región hidrológica número 31 Yucatán Oeste, y se infiltran en dirección al río Champotón. Predominan los suelos de tipo Gleysoles, con alto contenido de arcilla, baja capacidad de drenaje lo que origina la rápida saturación e impermeabilización; hacia la costa se encuentran Rendzina líticas que tienen una capa delgada de caliza poco profundas (SAGARPA, 2009).

METODOLOGÍA

La metodología propuesta para la estimación del riesgo de pérdidas por inundación en zonas agrícolas se divide en tres secciones: la primera parte evalúa el peligro por inundación mediante la aplicación del modelo hidrodinámico bidimensional el cual es alimentado por hidrogramas de diseño para diversos periodos de retorno y un modelo digital topobatimétrico en el que se integra la topografía de la cuenca de análisis, la batimetría del río Champotón y la zona costera cercana a la desembocadura del río en el Golfo de México. La segunda parte del método consiste en la elaboración de las funciones de daño por inundación para los cultivos más importantes de la cuenca del río Champotón. Para esta etapa, se hizo un análisis de la producción histórica de todos los cultivos que se llevan a cabo en la zona de estudio, una investigación bibliográfica de los diferentes métodos para evaluar daños en la agricultura y de las variables más importantes que consideran; adicionalmente se hicieron visitas a campo para realizar entrevistas a actores del medio (agricultores, investigadores y funcionarios estatales y federales cuyo trabajo se asocia a la agricultura) y finalmente, tomando en cuenta dichos elementos y la información disponible, se adaptaron criterios para la construcción de las curvas de daño en cultivos; en particular, se consideró la relación entre la etapa de desarrollo del cultivo y la probabilidad de que se presenten crecientes importantes asociada a cada etapa. La tercera etapa consiste en la construcción del modelo para evaluar el daño anual esperado por inundación en zonas agrícolas, el cual considera las primeras dos etapas, el uso de suelo y vegetación, así como los costos esperados de producción; . A continuación se desarrollan los principales pasos de la metodología propuesta para evaluar el daño por inundación en zonas agrícolas, Figura 2.

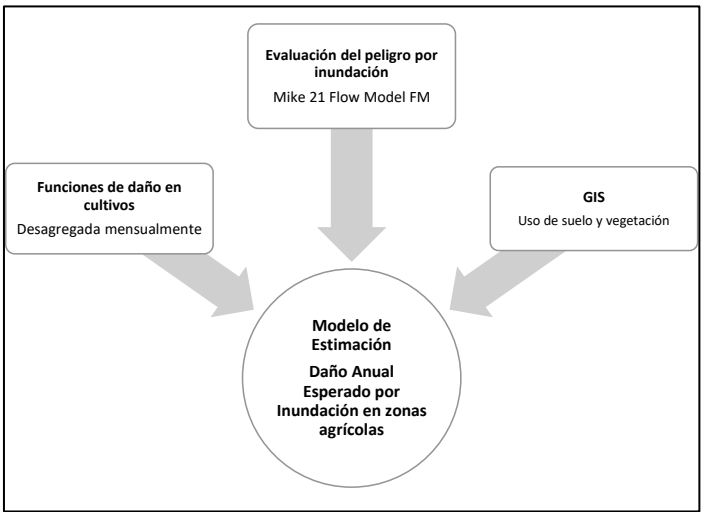


Figura 2.- Diagrama de flujo de la metodología propuesta

Evaluación del peligro por inundación

En el contexto del riesgo, el peligro se define como la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno potencialmente dañino de cierta intensidad, durante un cierto periodo de tiempo y en un sitio dado. Es importante definir los fenómenos perturbadores mediante parámetros cuantitativos con un significado físico preciso que pueda medirse numéricamente y ser asociado mediante relaciones físicas con los efectos del fenómeno sobre los bienes expuestos (Guevara et al, 2006).

Para caracterizar el peligro por inundación, en este trabajo se utilizó el modelo Mike 21 Flow Model FM (DHI, 2014), desarrollado por el Instituto Danés de Ingeniería Hidráulica, el cual contiene un sistema de modelado completo para los flujos a superficie libre en 2D aplicable a la simulación de fenómenos hidráulicos y afines en lagos, estuarios, bahías, zonas costeras y mares (DHI, 2014). El módulo utilizado fue el hidrodinámico (HD) para simular la variación de los niveles de agua y flujos sujetos a una variedad de condiciones de frontera en el área costera y en el río. En la Figura 3 se indica el diagrama de flujo del procedimiento aplicado.

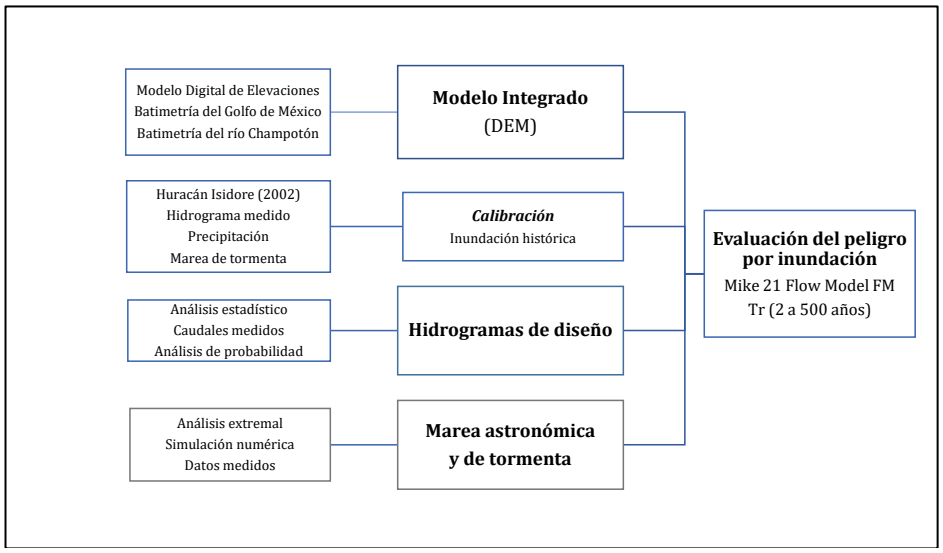


Figura 3.- Diagrama de flujo de las modelaciones hidráulicas

Se generó el modelo topobatimétrico completo ensamblando un Modelo Digital de Elevaciones (MDE, pixel de 20 x 20m) de la cuenca del río Champotón, con la batimetría del río Champotón realizada a partir de mediciones en campo con una ecosonda y GPS, de la costa del Golfo de México cercana a la desembocadura del río y la zona costera de la ciudad de Champotón, (Posada et al, 2013), la batimetría de esta zona fue complementada con la Carta Náutica 28260

correspondiente al Golfo de México-Barra Tupilco a Isla Piedra, año 1981 de la Secretaria de Marina Armada de México (SEMAR), Figura 4. El área de estudio está discretizada mediante una malla de celdas triangulares de dimensiones variables, lo que permite un mayor detalle en las zonas de interés, el río y la ciudad de Champotón, así como la desembocadura y la línea de costa. El modelo se calibró con las inundaciones históricas provocadas por el huracán Isidore (2002), datos recabados en campo, marea de tormenta (Posada et al, 2013) y el hidrograma de escurrimiento medido.

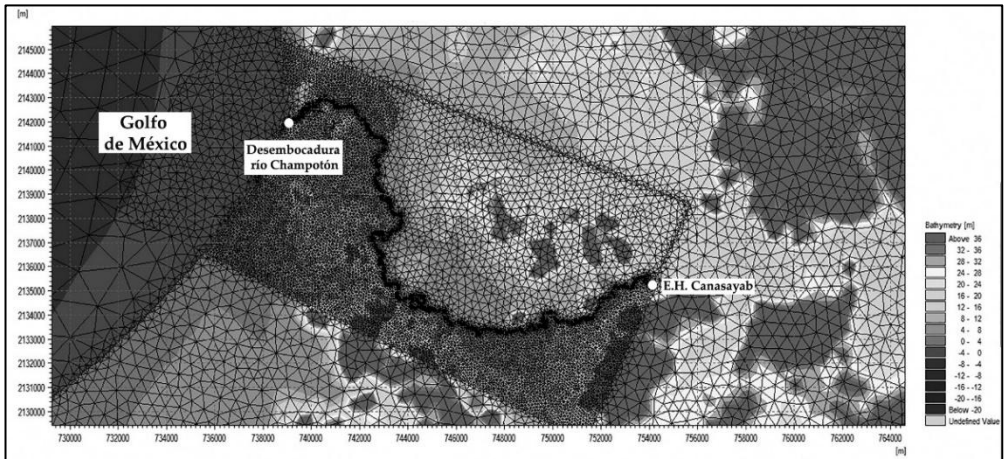


Figura 4.- Malla flexible con elementos de resolución variable. Cuenca del río Champotón

Hidrogramas de diseño

El análisis de frecuencias se utiliza como herramienta para predecir el comportamiento futuro de los caudales generados por eventos hidrometeorológico a partir de la información histórica y con base en procedimientos estadísticos se calcula la magnitud del caudal asociado a un período de retorno (Tr) el cual, se define como el número de años que transcurren en promedio para que un evento de magnitud dada x, sea igualado o excedido por lo menos una vez en ese periodo de tiempo (Escalante y Reyes, 2002). Para la generación de los hidrogramas de diseño se aplicaron las metodologías descritas por Domínguez et al. (2008).

Para caracterizar el peligro por inundación se utilizó el registro de caudales medidos en la estación hidrométrica Canasayab en el río Champotón durante el periodo de 1956 al 2011. Esta estación se encuentra ubicada a 39 km de la desembocadura del río Champotón al Golfo de México. No existen ríos tributarios relevantes sobre el tramo del río entre la estación de medición y el área de análisis. El proceso de simulación de las inundaciones se detalla en Ramírez V. (2015), como parámetros de salida de las modelaciones se utilizaron profundidad máxima del agua, duración y velocidad del flujo en cada una de las celdas de la malla flexible.

Funciones de daño por inundación en la agricultura

El desarrollo de las funciones de daño por inundación es uno de los procedimientos más importantes en la modelación para estimar las pérdidas en la agricultura (Yu et al. 2013). En algunos países desarrollados existen bases de datos históricos de los daños por inundaciones, en los diversos sistemas afectados, lo que permite generar curvas de daño (Meyer et al. 2009, Vozinaki et al. 2015). En el caso de estudio no se cuenta con una base de datos relacionada con daños en cultivos debido a inundaciones, por lo que, se adaptaron criterios y metodologías similares a las de Förster et al., (2008), Brémond et al., (2013) y Chau et al., (2014) para la construcción de las curvas de daño en cultivos. En la Figura 5 se muestra la secuencia propuesta para el desarrollo de las funciones.

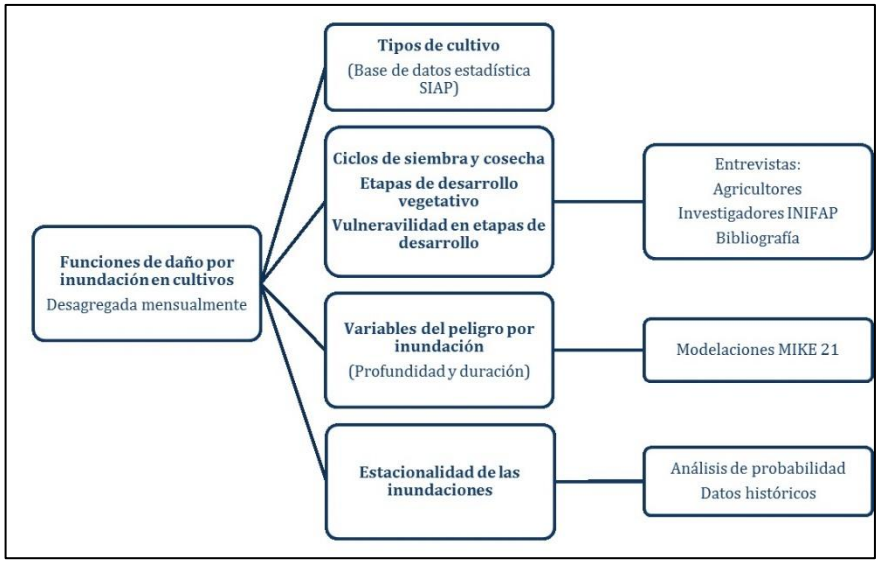


Figura 5.- Diagrama de flujo para la construcción de las funciones de daño en cultivos

Uso de suelo

Para delimitar las zonas agrícolas en el área de estudio se utilizó el conjunto de datos vectoriales de uso de suelo y vegetación del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), escala 1:250,000 serie V (2011-2012) actualizada con imágenes de satélite LANSAT 2011. De esta información, se obtuvieron los polígonos dedicados a la agricultura y del tipo de cobertura vegetal, respectivamente Figura 6.

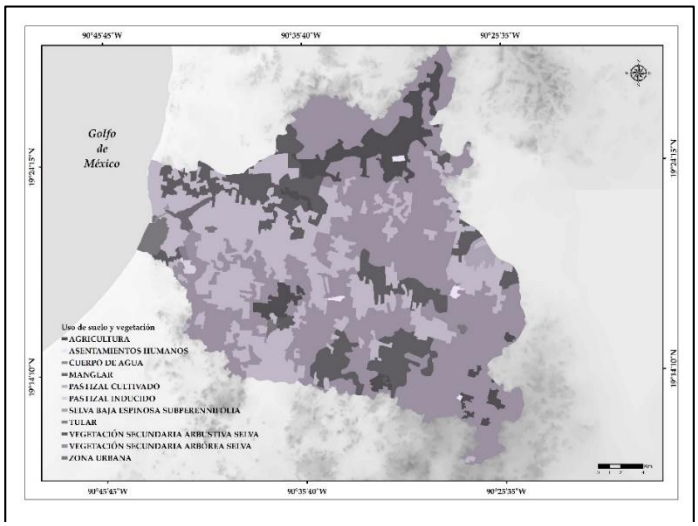


Figura 6.- Uso de suelo y vegetación en cuenca del río Champotón.

Estimación del daño

Existen diversos modelos que estiman el daño por inundación en la agricultura, cuyas diferencias radican en el número de variables que consideran y al final, en la existencia o disponibilidad de información medida para que se lleva a cabo su aplicación. En este trabajo se propone evaluar el daño agrícola ocasionado por una inundación, desagregando mensualmente el impacto del daño y los costos de producción del cultivo en función de las etapas de su desarrollo mediante el siguiente modelo:

Se estima la probabilidad de que se presente un gasto Q asociado a un Periodo de Retorno (Tr) en cada uno de los meses del año; para hacer la estimación se consideró que dicha probabilidad es proporcional a los gastos medios mensuales registrados en la estación Canasayab. El dato que se genera es el valor de una probabilidad P(i) para cada mes i. Se obtiene el porcentaje de daño del

cultivo (valor de 0-1) para cada mes ante una inundación provocada por un gasto asociado a un Tr, (QTr). Este dato se extrae de la función del impacto del daño propuesta para las diferentes duraciones de inundación. Se proponen 4 intervalos de duración d de la inundación y los datos que se generan se les denomina %D(i, d). Se determina el valor del costo por hectárea ($/ha) que tiene el cultivo en el mes de acuerdo con la etapa de desarrollo en el proceso de producción. A los valores obtenidos se les denomina CPHC(i). Para cada inundación asociada a un Tr y cada intervalo de duración, se estima un daño anual, DCd, mediante la suma ponderada de los daños correspondientes a los 12 meses del año:

$$DC_d = \sum_{i=1}^{n} P_i \cdot \%D_{i,d} \cdot CPHC_i \quad (1)$$

Se determina el área inundada por un gasto Q asociado a un Tr para los diferentes intervalos de duración. Se denomina a esta variable ACI(j) en ha, donde j varía en función del número de Tr analizados. Se realiza el cálculo del daño, denominado D, para cada intervalo de duración:

$$D(Q_{Tr}) = DC_d \cdot ACI_j \quad (2)$$

Para cada intervalo de duración, se construyen las curvas de riesgo; cada punto de la curva tiene coordenadas ($D(Q_{Tr})$, Tr). Se obtiene el daño anual esperado como el área bajo la curva de riesgo para cada intervalo de duración (Meyer et al. 2012).

$$DAE = \sum_{j=1}^{m} \frac{D(P_{Trj-1}) + D(P_{Trj})}{2} * \Delta P_j \quad (3)$$

Donde ΔPj es el incremento de la probabilidad de excedencia entre periodos de retorno (Tr). El daño total promedio se obtiene mediante la suma de cada intervalo de duración. Se denomina DTP. Se construye la curva de riesgo con el daño total promedio para cada Tr, (DTP, Tr). El área bajo la curva de riesgo da como resultado el daño anual esperado promedio, DAEP.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las modelaciones realizadas con el programa hidrodinámico permitieron caracterizar el peligro por el desbordamiento del río Champotón así como las llanuras de inundación. Se obtuvieron los valores de los tirantes máximos, velocidades y la duración de las inundaciones para cada celda de la malla flexible. Para la calibración del modelo se utilizó el hidrograma medido del huracán Isidore (2002) contrastando los resultados modelados de alturas de inundación con los obtenidos en campo mediante entrevistas realizadas a los residentes de las colonias y poblaciones rurales afectadas. Los sitios donde se levantaron las encuestas de daños se muestran en la Figura 7.

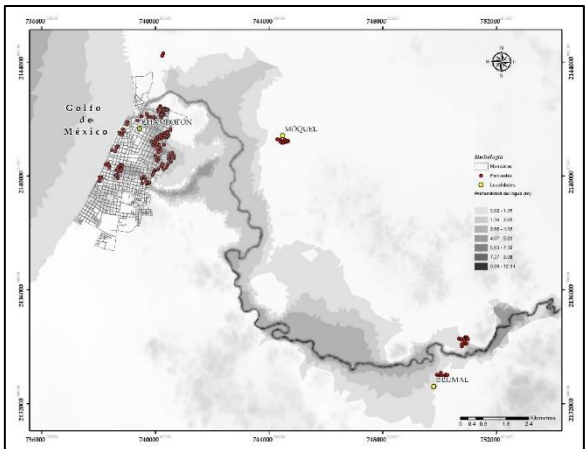


Figura 7.- Resultados de la modelación hidráulica, profundidades máximas del agua para Isidore 2002.

Considerando que en la obtención del daño agrícola el costo de producción y el impacto del daño en los cultivos se han desagregado sobre una base mensual, de forma similar se realizó el análisis histórico de los gastos de la EH Canasayab (1956-2011). La Figura 8 muestra la distribución de escurrimientos mensuales promedio de todo el registro, de acuerdo con Agraz et al., 2015 se identifican tres épocas climáticas en el estado de Campeche que son la de secas, lluvias y nortes; se observa que durante la época de secas (febrero a abril) la magnitud de los caudales pico es relativamente pequeña pero el impacto del daño es mayor. Por otro lado, la época definida como de lluvias se encuentra bien establecida para los meses de mayo a octubre y de acuerdo con el análisis de frecuencias, los gastos máximos anuales se concentran en los meses de septiembre y octubre principalmente. Es importante comentar que en la época definida como de "nortes" la humedad es acompañada con fuertes vientos fríos que bajan del noreste, los cuales se presentan dentro de los meses de noviembre a enero, que si bien el orden de magnitud en los gastos pico es pequeño comparada con los de la época de lluvias, por existir una humedad antecedente del suelo, la vulnerabilidad en las zonas agrícolas es considerable.

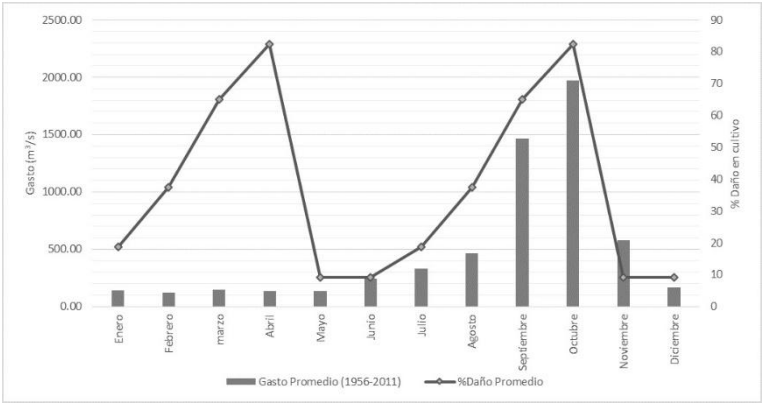


Figura 8.- Caudales de la E.H. Canasayab (1956-2011)

Se consideró importante desarrollar una desagregación mensual en la probabilidad de ocurrencia de una inundación por la fuerte dependencia de las pérdidas en la agricultura según el mes de ocurrencia de las inundaciones (Förster et al. 2008). En el cuadro 2 se muestran los valores de los escurrimientos medios mensuales y sus valores relativos al total anual, las inundaciones extremas asociadas a un caudal pico máximo se presentan en los meses de septiembre y octubre; que a su vez en estos meses, de acuerdo a la función promedio del daño en el maíz (Figura 8) es la etapa más vulnerable para el ciclo P-V del cultivo, justo antes y durante la cosecha.

Cuadro 2.- Escurrimientos históricos mensuales. Estación Canasayab

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Gasto promedio Mensual	142.98	121.82	145.78	137.08	133.75	242.14	331.17	466.43	1465.52	1971.99	579.30	164.88
P(i)	0.024	0.021	0.025	0.023	0.023	0.041	0.056	0.079	0.248	0.334	0.098	0.028

Siendo el maíz uno de los principales cultivos de la zona de estudio el caso de análisis se aplicó exclusivamente para aquellos predios donde se identificó este tipo de cultivo. El impacto del daño se dividió en 4 categorías en función de la duración de la inundación en las diferentes etapas de desarrollo del cultivo. De acuerdo con los resultados de las entrevistas, en los meses de mayo y junio el impacto del daño es pequeño para los rangos de duración de 1 a 3 días y de 4 a 7 días de inundación ya que las afectaciones sólo implican un retraso en la preparación del terreno y en la fecha de siembra. Por otro lado, los porcentajes de daño se incrementan considerablemente, para los distintos rangos de duración, entre los meses de julio a agosto que coincide con un periodo crítico de desarrollo del cultivo, que va de los 45 a 75 días de edad de la planta, pues es donde el cultivo se desarrolla en altura y se establece la floración, posteriormente entre septiembre y octubre se

presenta el llenado de grano y comienza la cosecha dependiendo de las condiciones de humedad del grano, en esta etapa el impacto del daño que se maneja es de pérdida total, Figura 9.

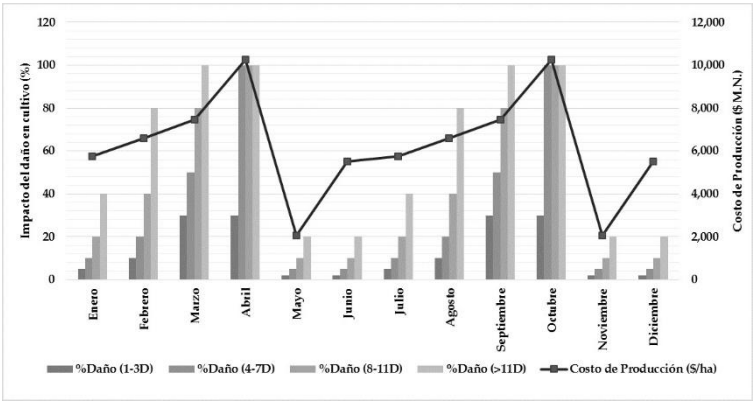


Figura 9.- Impacto del daño y costos de producción en cultivo de maíz. Fuente de los costos: Campo experimental Edzná-INIFAP, 2015

Se consideran los costos directos del proceso de producción desagregados mensualmente (Figura 9), conforme se desarrolla el cultivo se van implementando diversas actividades acumulando el costo que implica cada una de éstas, de las que destacan en las acciones siguientes: preparación del suelo, costos de semilla, fertilización, combate de malezas, combate de plagas, cosecha. La evaluación del daño por inundación en zonas agrícolas se obtiene con las ecuaciones 1 a 3, mediante la interacción de las mallas de resultados de las modelaciones del peligro, uso de suelo y vegetación, las funciones de daño por tipo de cultivo y los costos de los procesos de producción. El Cuadro 3 indica, para cada escenario analizado en la simulación hidráulica, la magnitud de las áreas destinadas al cultivo y desagregadas por el rango de duración de la inundación.

Cuadro 3.- Áreas de cultivo inundadas

Tr (años)	Áreas (ha)			
	Duración de la inundación (días)			
	1-3	4-7	8-11	Mayor a 11
2	0.1488	1.96847	2.46554	6.4838
5	0.25843	2.0113	4.08826	22.42063
10	0.51453	3.15503	4.20933	37.32747
20	0.65314	3.67466	5.6057	48.87276
50	0.9211	9.01778	14.08794	52.27633
100	1.87926	16.56971	27.21081	79.03159
200	11.5739	21.13848	39.96751	81.53425
500	21.4516	48.66245	52.79741	97.70343

En una primera etapa de la evaluación se obtiene el daño D (Q_{Tr}), considerando la probabilidad P(i) de que se presente una inundación en los diferentes meses del año; el porcentaje del impacto del daño, % D(i, d) de una inundación en el mes i con una cierta duración; y el costo de producción del cultivo CPHC(i) en el mes i de desarrollo. Es decir, desagregados mensualmente y obtenidos para cada área cultivada inundada ACI (j), en cada escenario, Q (Tr), e intervalo de duración, d(i).

El procedimiento descrito anteriormente se desarrolla para cada escenario analizado asociado, para este estudio, a distintos periodos de retorno e intervalos propuestos de duración de inundación. En la Figura 10 se muestran las curvas para obtener el riesgo como el daño anual esperado en el cultivo de maíz, diferenciadas por intervalo de duración de la inundación. De igual forma se construyó la curva de riesgo para el daño total promedio para cada Tr, con coordenadas

(DTP, Tr). Utilizando la ecuación 3, el área bajo la curva de riesgo da un valor del daño anual esperado promedio (DAEP) de $102,494.29 por ha.

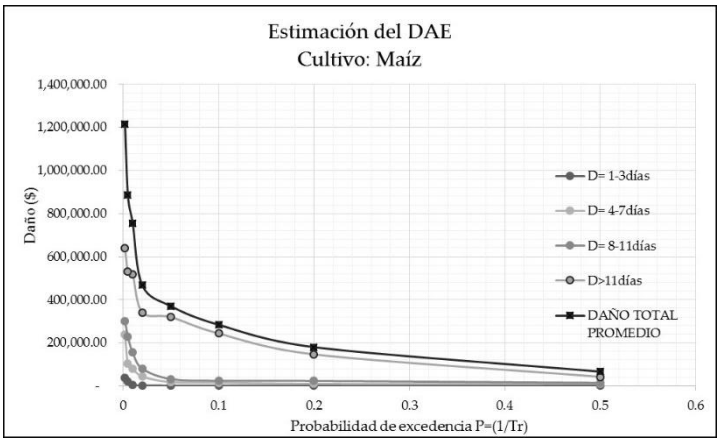


Figura 10.- Daño anual esperado (DAE) para el cultivo de maíz

Conclusiones

La metodología propuesta permite estimar el daño anual esperado considerando la duración, estacionalidad y profundidad de la inundación para construir las funciones de daño. Debido a que no se cuenta con una base de datos de daños en el sector agrícola que considere dichos parámetros para generar las curvas de daños, se tomaron como referencia criterios citados en la literatura así como entrevistas con agricultores, investigadores y funcionarios del sector agropecuario. La construcción de las funciones de daño considera una combinación de la etapa de desarrollo del cultivo con cuatro rangos de duración de la inundación con el objetivo de cuantificar desde una disminución en la producción hasta la pérdida total del cultivo. Por otro lado, con respecto al parámetro de la profundidad del agua, en el análisis se consideró que el daño ocurre a partir de que la celda esta mojada y hasta el tirante máximo, debido a que el daño en el cultivo por inundación inicia por la disminución del oxígeno en el suelo que genera un deterioro en la raíz de la planta y como consecuencia un inadecuado desarrollo y rendimiento.

El modelo propuesto para la evaluación de las pérdidas en los cultivos se aplicó a la cuenca del río Champotón, que por su ubicación se ha visto expuesta a diversas inundaciones históricas asociadas a la presencia de huracanes; entre los registrados con mayor severidad destacan Gilberto (1988), Opal y Roxanne (1995) e Isidoro (2002). Los resultados de este trabajo son parte importante para la evaluación del riesgo por inundaciones asociadas al río Champotón y pueden ser utilizados por los tomadores de decisiones de las diferentes entidades de gobierno para establecer de manera más acertada los planes de ordenamiento y por otro lado, para ajustar las primas de los seguros agropecuarios.

Es importante mencionar que la disponibilidad de información del uso de suelo es limitada, ya que no contienen una tipología detallada de los cultivos en la zona propiciando simplificaciones en la metodología. Sin embargo, se recomienda realizar un análisis más detallado sobre los cultivos que se desarrollan en la zona, como el sorgo, arroz palay, soya, pastizal y caña de azúcar, considerando patrones de cultivo más complejos que incluyan la rotación de cultivos entre los ciclos Primavera-Verano (P-V) y Otoño-Invierno (O-I). Así mismo, es necesario incluir en la estimación de daños otros elementos que intervienen en la agricultura como la maquinaria agrícola, edificios, silos, entre otros. Lo anterior implica generar información en campo más detallada a nivel de parcela.

REFERENCIAS

Agraz-Hernández, C. M., C. A. Chan Keb, S. I. Iriarte-Vivar, G. Posada Vanegas, B. E. Vega Serratos y J. Osti Sáenz. (2015). Phenological variation of *Rhizophora mangle* and ground water chemistry associated to changes of the precipitation. *Hidrobiológica* 25 (1):49-61

Brémond, P., Grelot F. and Agenais A. L. (2013). Review Article: Economic evaluation of flood damage to agriculture– review and analysis of existing methods. *Nat. Hazards Earth Syst.* Sci., 13, 2493–2512, 2013 www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/13/2493/2013/

Citeau J. M. (2003) A new flood control concept in the Oise catchment area: definition and assessment of flood compatible agricultural activities. *FIG Working Week*, April. France, Paris, pp 13–17. Recuperado de https://www.fig.net/resources/proceedings/fig_proceedings/fig_2003/TS_14/TS14_5_Citeau.pdf

Chatterton, J., Viavattene, C., Morris, J., Penning-Rowsell, E., and Tapsell, S. (2010). The Costs of the Summer 2007 Floods in England, Tech. rep., *Environment Agency*. Recuperado de http://nationalfloodforum.org.uk/wp-content/uploads/EA-Costs-of-Flooding.pdf

Chau, V.N., Cassells, S. & Holland, J. (2014.) Economic impact upon agricultural production from extreme flood events in Quang Nam, central Vietnam. *Nat Hazards.* First Online: 05 September 2014 DOI: 10.1007/s11069-014-1395-x.

DHI, M. B. (2014). MIKE 21 Y MIKE 3 FLOW MODEL FM. *Hydrodynamic and Transport Module. Scientific Documentation*. 10 ed. Dinamarca: s.n.

DHI, M. B. (2014). MIKE 21 Y MIKE 3 FLOW MODEL FM. *Hydrodynamic Module. Step-by-step training guide*. Dinamarca: DHI.

Domínguez, R., Esquivel, G., Méndez, B., Mendoza, A., Arganis, M.L., Carrizosa, E. (2008). Manual del Modelo para pronóstico de escurrimiento. *Series Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México*. 101 p.

Dutta D, Herath S, Musiake K. (2003). A mathematical model for flood loss estimation. *J Hydrol 277:24–49. doi:10.1016/s0022-1694(03)00084-2*

Escalante, C. A. y Reyes Chávez, L. (2002). Técnicas estadísticas en hidrología. Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Facultad de Ingeniería. México, 298 pp.

Förster S, Kuhlmann B, Lindenschmidt KE, Bronstert A. (2008). Assessing flood risk for a rural detention area*. Nat Hazards Earth Syst Sci 8:311–322. doi:10.5194/nhess-8-311-2008*

Guevara, O., Quaas W., Fernández, V. (2006). Lineamientos Generales para la elaboración de atlas de riesgos. En Conceptos básicos sobre peligros, riesgos y representación geográfica. *Serie: Atlas Nacional de Riesgos*. ISBN: 970-628-904-6. 1ra. Edición, noviembre 2006.

Jiménez, E. M. (1992). AX (Ajuste de Función de Probabilidad) versión 1.05. *Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED)*, Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). México, D.F.

Kadam P, Sen D. (2012). Food inundation simulation in Ajoy River using MIKE FLOOD. J *Hydraul Eng* 2:129–141

Li, K., Wu, S., Dai, E., Xu, Z. (2012). Flood loss analysis and quantitative risk assessment in China. *Nat Hazards (2012) 63: 737. doi:10.1007/s11069-012-0180-y*

Martínez A. (2011). Estudio hidrológico e hidráulico de la cuenca del río Champotón: Mapas de Peligro y Sistemas de Información Geográfica. *Tesis de Licenciatura, Universidad Autónoma de Campeche, Facultad de Ciencias Químico-Biológicas.* México.

Merz, B., Kreibich, H., Schwarze, R., and Thieken, A. (2010). Review article "Assessment of economic flood damage", *Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 10, 1697–1724*, doi:10.5194/nhess-10-1697-2010

Meyer, V. and Messner, F. (2005). National Flood Damage Evaluation Methods. A Review of Applied Methods in England, the Netherlands, the Czech Republic and Germany, *Deliverable of task 9 of FLOODSite project 2_0_P44, UFZ* – Department of Economics.

Meyer, V., Scheuer S, Haase D. (2009). A multicriteria approach for flood risk mapping exemplified at the Mulde River, Germany. *Nat Hazards 48:17–39*

Meyer, V., Priest, S. & Kuhlicke, C. (2012). Economic evaluation of structural and non-structural flood risk management measures: examples from the Mulde River. *Nat Hazards. doi:10.1007/s11069-011-9997-z*

Morris, J. and Brewin, P. (2013). The impact of seasonal flooding on agriculture: the spring 2012 floods in Somerset, England, J. *Flood Risk Manage., doi:10.1111/jfr3.12041*, online first, 2013.

Patro, S., Chatterjee, C., Mohanty S, Singh, R., Raghuwanshi, N. S. (2009). Flood inundation modelling using MIKE FLOOD and remote sensing data. *J Indian Soc Remote Sens 37:107–118*. doi:10.1007/s12524-009-0002-1

Pistrika, A. (2010). Flood damage estimation based on flood simulation scenarios and a GIS platform. *Eur Water 30:3–11*

Pivot, J.-M., Josien, E., and Martin, P. (2002). Farms adaptation to changes in flood risk: a management approach, J. *Hydrol., 267, 12–25.*

Posada G., Vega B., Ruiz G., Echávez-Aldape G., Martínez A. (2011). Áreas inundables para la cuenca del río Champotón, Campeche: escenarios actuales y futuros. En: A.V. Botello, S. Villanue¬va-Fragoso, J. Gutiérrez, y J.L. Rojas Galaviz (ed.). *Vulnerabilidad de las zonas costeras mexicanas ante el cambio climático*, 2da edición. SEMARNAT-INE, UNAM-ICMyL, Universidad Autónoma de Campeche.

Posada Vanegas G., B.E. Vega Serratos, y R. Silva Casarin (eds.), (2013). Peligros Naturales en el Estado de Campeche. *Cuantificación y Protección Civil*. Universidad Autónoma de Campeche, CENECAM-Gobierno del Estado de Campeche, CENAPRED. 202 p.

Posthumus, H., Morris, J., Hess, T. M., Neville, D., Philips, E., and Baylis, A. (2009). Impacts of the summer 2007 floods on agriculture in England, J. *Flood Risk Manage., 2, 182–189.*

Ramírez V. D. L. (2015). Modelación de escenarios en las zonas inundables ante la construcción de un desvío carretero en la ciudad de Champotón, Campeche. *Tesis de Maestría*, Universidad Autónoma de Campeche, Facultad de Ciencias Químico-Biológicas. México.

Ritchie, S., Hanway, J. (1982). How a corn plant develops. Special Report N°48. *Cooperative Extension Service*, Iowa State University, Ames, IA, USA, 21 p.

Roca, M., Bast, H., Panzeri, M., Hess, T. M., Sayers, P., Flikweert, J., Ogunyoye, F., and Young, R. (2011). Developing the evidence base to describe the flood risk to agricultural land in England and Wales, *R&D Technical Report FD2634/TR*, DEFRA.

SAGARPA (2009). PRONAC. "Digitalización del Campo Cañero en México para alcanzar la Agricultura de Precisión de la Caña de Azúcar". Desarrollo de un Modelo Integral de SIG y Edáfica como Fundamento de la Agricultura de Precisión en la Caña de Azúcar en México. Etapa I, San Francisco de Campeche: SAGARPA. GOBIERNO FEDERAL.

Smith, D. I. (1994). Flood damage estimation—a review of urban stage–damage curves and loss functions. *Water SA 20(3):231–238*

Sommer, T., Karpf, C., Ettrich, N., Haase, D., Weichel, T., Peetz, J.-V., Steckel, B., Eulitz, K., and Ullrich, K. (2009). Coupled modelling of subsurface water flux for an integrated flood risk management, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 9, 1277-1290, doi:10.5194/nhess-9-1277-2009.

Thieken, A. H., Ackermann ,V., Elmer, F., Kreibich, H., Kuhlmann, B., Kunert, U. (2008). Methods for the evaluation of direct and indirect flood losses. In: Proceedings of the *4th international symposium on flood defence: managing flood risk, reliability and vulnerability*, May 6–8, Toronto, Ontario, Canada

Twining, S., Procter, C., Wilson, L., Frost, A., Phillips, K., Turner, T., Tiffin, D., Emery, J., Walker, O., Welch, S., and Wells, A. (2007). Impacts of 2007 Summer Floods on Agriculture, *Tech. Rep. Final*, ADAS, Cambridge, UK.

USACE (1985). AGDAM, Agricultural Flood Damage Analysis, User's Manual (Provisionnal), Computer Program Documentation CPD-48, US Army Corps of Engineers, Institute for Water Resources, Hydrologic Engineering Center (HEC), Davis, CA.

Vosinaki, A.E., Karatzas, G., Sibetheros, I., Varouchakis, E. (2015). An agricultural flash flood loss estimation methodology: the case study of the Koiliaris basin (Greece), February 2003 flood. *Nat Hazards (2015) 79:899–920 DOI 10.1007/s11069-015-1882-8*.

Yu, J.J., Qin, X.S., Larsen, O. (2013). Joint Monte Carlo and possibilistic simulation for flood damage assessment. *Stoch Environ Res Risk A 27:725–735. doi:10.1007/s00477-012-0635-4*

IAHR AIIH
XXVIII CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA
BUENOS AIRES, ARGENTINA, SEPTIEMBRE DE 2018

RELACIÓN ENTRE PIB, SERVICIOS DE AGUA Y SANEAMIENTO, POBLACIÓN Y TUGURIOS. ZONAS URBANAS EN AMÉRICA LATINA

María Alejandra Caicedo Londoño[(1)], Carlos Felipe Urazán Bonells[(1)], Luis Efrén Ayala Rojas, Sandra Liliana Uribe Celis[(1)]

(1) Universidad de La Salle, Bogotá, Colombia, macaicedo@unisalleedu.co, caurazan@unisalle.edu.co, layalar@unisalle.edu.co, sluribe@unisalle.edu.co

RESUMEN

La creciente explosión demográfica en el mundo y en la región latinoamericana exigen la mejora de calidad de vida en los sectores con población de menos recursos. Entre las mayores urgencias está la extensión de redes de abastecimiento de agua y saneamiento. Una correlación del comportamiento reciente de la cantidad de población atendida con estos servicios públicos permite establecer un modelo de correlación multilineal que concluye que la extensión de las redes de saneamiento básico en zonas urbanas está ligada a la capacidad económica del país y a la cobertura que tiene la red de abastecimiento de agua segura. En el caso de las zonas rurales, la correlación de la extensión de la red de saneamiento es de la cobertura poblacional de la red de abastecimiento de agua, no del potencial económico del país.

ABSTRACT

The growing demographic explosion in the world and in the Latin American region demand the improvement of quality of life in the sectors with a population of less resources. Among the greatest urgencies is the extension of water supply and sanitation networks. A correlation of the recent behavior of the amount of population served with these public services allows us to establish a multilinear correlation model that concludes that the extension of basic sanitation networks in urban areas is linked to the country's economic capacity and the coverage of the safe water supply network. In the case of rural areas, the correlation of the extension of the sanitation network is the population coverage of the water supply network, not the economic potential of the country.

PALABRAS CLAVES: Crecimiento poblacional, extensión de redes de servicios, red de saneamiento.

INTRODUCCIÓN

En el año 2000, la Organización de las Naciones Unidas ONU resaltaron el hecho de que en los países en desarrollo continuaban creciendo los sectores informales (slums, término aplicado en la literatura especializada en idioma inglés) y aquello se presentaba como un obstáculo para el desarrollo sostenible. Por tanto, acordaron entre sus países miembros los denominados Objetivos del Milenio ODM como un mecanismo de política pública que facilitaría la mejor calidad de vida para cerca de 100 millones de personas pobres en el planeta. Entre las características a destacar en los asentamientos de desarrollo incompleto, o también conocidos como carenciados o informales, se tiene (Abubacar, Romice y Salama, 2017):

- Acceso inadecuado al agua potable,
- Acceso inadecuado a saneamiento y a otros servicios e infraestructura básica,
- Condición inadecuada en las viviendas y baja calidad estructural de las mismas, y
- Hacinamiento e inseguridad de la tenencia.

La definición de slums y sus características también es expuesta por otros autores en documentos recientes, y con experiencias centradas en países de América Latina, como Galiani et al. (2017), y Kent (2016).

Como se ha presentado, entre las principales características que afectan a los habitantes de los sectores informales, irregulares o tugurios, entre una diversidad de términos, está el acceso inadecuado al agua segura y a los servicios de saneamiento básico. Es por ello que las metas del milenio plantearon al interior del objetivo 7 “Garantizar la sostenibilidad del medio ambiente” las siguientes (ONU, 2015):

- 7C. Reducir a la mitad, para 2015, la proporción de personas sin acceso sostenible al agua potable y a servicios básicos de saneamiento.
- 7D. Haber mejorado considerablemente, en 2015, la vida de al menos 100 millones de habitantes de barrios marginales.

Ir tras esas metas es importante no solo por cuanto liga la condición de pobreza e infraestructura, sino porque genera un cambio fundamental en la manera de vivir de muchas comunidades que tienen que recurrir cotidianamente a soluciones alternativas para suplir la no conexión a las redes.

METODOLOGÍA APLICADA

La investigación relacionada se desarrolló teniendo como base los datos de la CEPALSTAT de la Comisión Económica para América Latina y el Caribe CEPAL, división de las Naciones Unidas (ONU). El emplear una sola base de datos da confianza en la unificación de criterios en los indicadores empleados.

La muestra de países analizada corresponde a 19 naciones consideradas las más representativas de la región: Argentina, Bolivia, Brasil, Chile, Colombia, Costa Rica, Ecuador, El Salvador, Guatemala, Honduras, Jamaica, México, Nicaragua, Panamá, Paraguay, Perú, República Dominicana, Uruguay y Venezuela. El objetivo principal es encontrar modelos multilineales que explicaran el logro de una mayor cobertura poblacional (%) de agua segura y saneamiento básico en la región, a partir de la condición demográfica, situación económica y la demanda inmediata en sectores de menos recursos económicos.

El objetivo principal es encontrar modelos multilineales que explicaran el logro de una mayor cobertura poblacional (%) de agua segura y saneamiento básico en la región, a partir de la condición demográfica, situación económica y la demanda inmediata en sectores de menos recursos económicos.

Para ello se tomó información de los siguientes indicadores nacionales de la CEPALSTAT:

- Proporción de la población que utiliza fuentes mejoradas de abastecimiento de agua potable, por área urbana.
- Proporción de la población que utiliza instalaciones de saneamiento mejoradas, por área urbana.
- Población urbana.
- Producto interno bruto (PIB) total anual por habitante a precios constantes en dólares.
- Población urbana que vive en tugurios.

El último indicador tiene relevancia por cuanto todos los países en estudio tienen una mayor población urbana, y en ese escenario en que se presenta la condición tugurial, que cuenta entre sus características principales la ausencia de mecanismos adecuados para abastecimiento de agua segura y saneamiento básico.

Las cifras empleadas en el estudio son las más recientes de la base de datos, para el año 2015 con excepción del dato de tugurios que está actualizado en la web solo hasta el año 2014. El año 2015 cobra relevancia por cuanto es en el cual se dio cierre al cumplimiento de los ODM.

De los datos estadísticos resultantes de las distintas correlaciones multilineales se revisa en primer término si el coeficiente de regresión R^2 ajustado resulta superior a 0.7. De ser así las variables independientes tienen un alto grado de explicación en conjunto con la variable dependiente y así hay confianza en que la ecuación resultante o modelo matemático tendrá errores mínimos al contrastar sus resultados con los valores de la base de datos que sirvieron para realizar la correlación. Después se procede a identificar cuáles de las variables explicativas tenían una fuerte relación con el resultado de la variable dependiente. En este caso se trata de una lectura individual para cada variable. El grado de error que aporta cada variable independiente se interpreta por medio del valor "p" o p-value que Excel denomina "probabilidad". Para trabajar con un nivel de confianza del 95% el p-value debe resultar igual o inferior a 0.05 (Manterola y Pineda, 2008). Si alguna variable no cumple esa condición, se descarta como variable explicativa del fenómeno y se procede a una nueva regresión aplicando solamente las que sí cumplieron.

El otro hecho que descarta una adecuada relación de cada una de las variables independientes en el modelo es el signo del coeficiente. Por ejemplo, si la hipótesis que fundamenta el modelo planteado asume que al incrementarse el valor de la respectiva variable independiente, también debería aumentar el valor de la variable dependiente, ese coeficiente debería ser positivo. Por el contrario, si el signo del coeficiente es negativo, se descarta la variable correspondiente como explicativa del modelo. Finalmente, el modelo queda establecido con las variables independientes que cumplan condiciones favorables en signo de coeficiente y en p-value, y que en conjunto resulte un R^2 ajustado superior a 0.7.

CORRELACIÓN ENTRE PIB Y SERVICIOS, POBLACIÓN Y TUGURIOS

Con el fin de encontrar un modelo regional por países que ayude a comprender algunas condiciones globales que expliquen el alcance de la cobertura de las redes de servicios de agua y saneamiento a nivel urbano, así como la reducción de la población que habita en tugurios; se aplicó la misma metodología de correlación multilineal que en Urazán y Caicedo (2018a), planteando la hipótesis que el PIB per cápita global de cada país estuviera explicado en parte por el comportamiento de la cobertura de los servicios públicos de agua y saneamiento en zonas urbanas, la población urbana en el ámbito nacional y el porcentaje de habitantes que habita en tugurios. Tras analizar el planteamiento estadísticamente se concluye inicialmente que el resultado no es fiable por cuanto el R^2 resultó en 0.43, muy similar al 0.48 resultante con las cuentas nacionales (es decir, sin discriminar la información para los escenarios urbano y rural) (Urazán y Caicedo, 2018a). Adicionalmente, los p-value resultaron altos en valor (con límites entre 0.19 para población urbana y 0.66 para la cobertura del servicio de agua). Estas últimas cifras empiezan a mostrar una mejor

correlación para el presente análisis (es decir, solo con cifras urbanas). En este caso resulta inesperado que el coeficiente para tugurios sea positivo, pues se asumía negativo basado en la premisa de que a menor cantidad de habitantes en tugurios habría mejor comportamiento económico.

Como alternativa al uso de las mismas variables dependiente e independiente, se replanteó el modelo con la diferencia de hacer el intercepto igual a cero. En ese caso el valor de R^2 resultó favorable (0.79), pero los p-value superaron 0.17. En esta situación el coeficiente por tugurios dio valor negativo, tal como se esperaba, pero el modelo se descarta por los p-value.

Luego se descartó a la población en tugurios como variable explicativa y se obtuvo nuevamente un R^2 no apropiado (0.43, menor correlación que el 0.53 obtenido al emplear datos agregados o nacionales) y los p-value registraron por encima de 0.36 para la variable agua (condición menos apropiada que al manejar datos agregados, caso en el cual el menor p-value fue de 0.12). En este caso no hubo p-value inferior a 0.05.

En Urazán y Caicedo (2018a) en este momento del análisis se infería que la variable que acompaña el comportamiento del PIB per cápita en la región es la cobertura poblacional de saneamiento. En el presente caso (trabajando solo con los datos urbanos), se repite la situación para el mismo indicador al obtener un p-value de 0.004. En el caso de la cobertura del servicio de agua el p-value se sale del rango esperado al registrar 0.72, así como la población urbana con 0.14.

No obstante, si se compara el comportamiento de las cuentas nacionales con las urbanas se aprecia gráficamente que en el caso de las primeras hay mayor énfasis o acompañamiento de los picos y valles de los servicios respecto a la tendencia del PIB (figuras 1 y 2). Se observa claramente que la variable que mejor acompaña el comportamiento del PIB en cuanto a una secuencia de picos y valles es la cobertura poblacional en materia de saneamiento básico.

En las 2 figuras la escala para el PIB está en relación (1/100), y los indicadores hacen referencia a: Producto Interno Bruto (PIB) total anual por habitante a precios constantes en dólares; la proporción de la población que utiliza fuentes mejoradas de abastecimiento de agua potable; y la proporción de la población que utiliza instalaciones de saneamiento mejoradas.

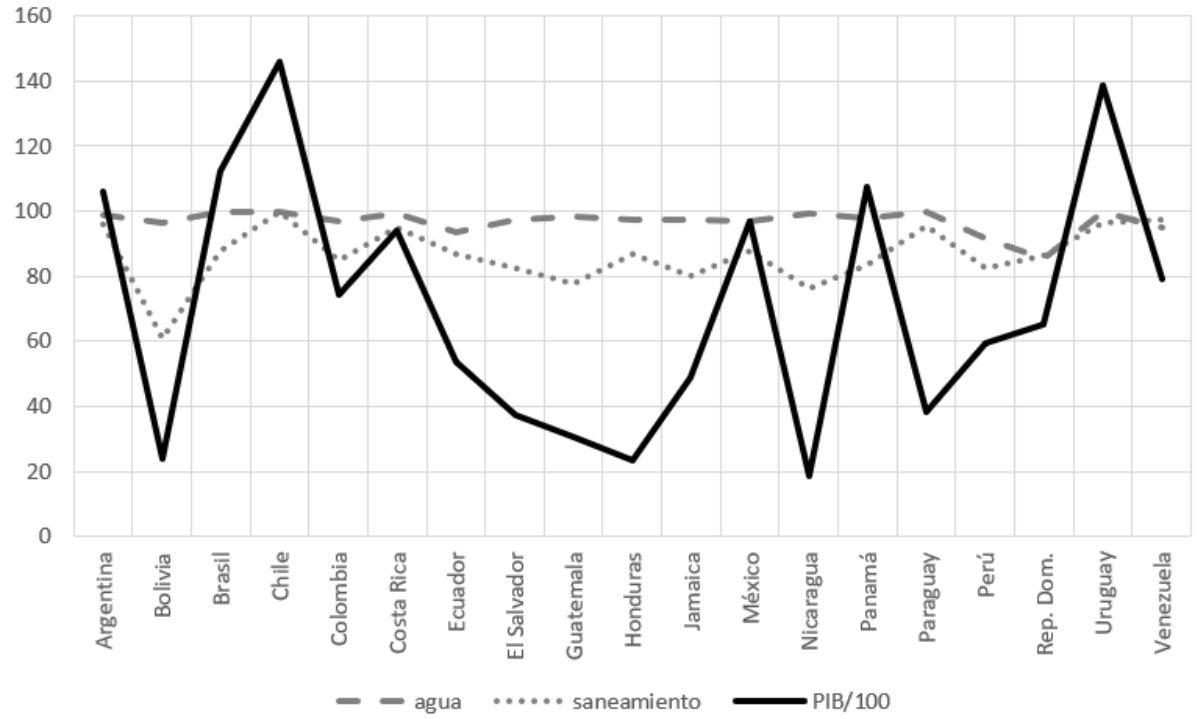


Figura 1.- Comportamiento del PIB per cápita y de la cobertura poblacional en agua y en saneamiento. Cifras urbanas a 2015.

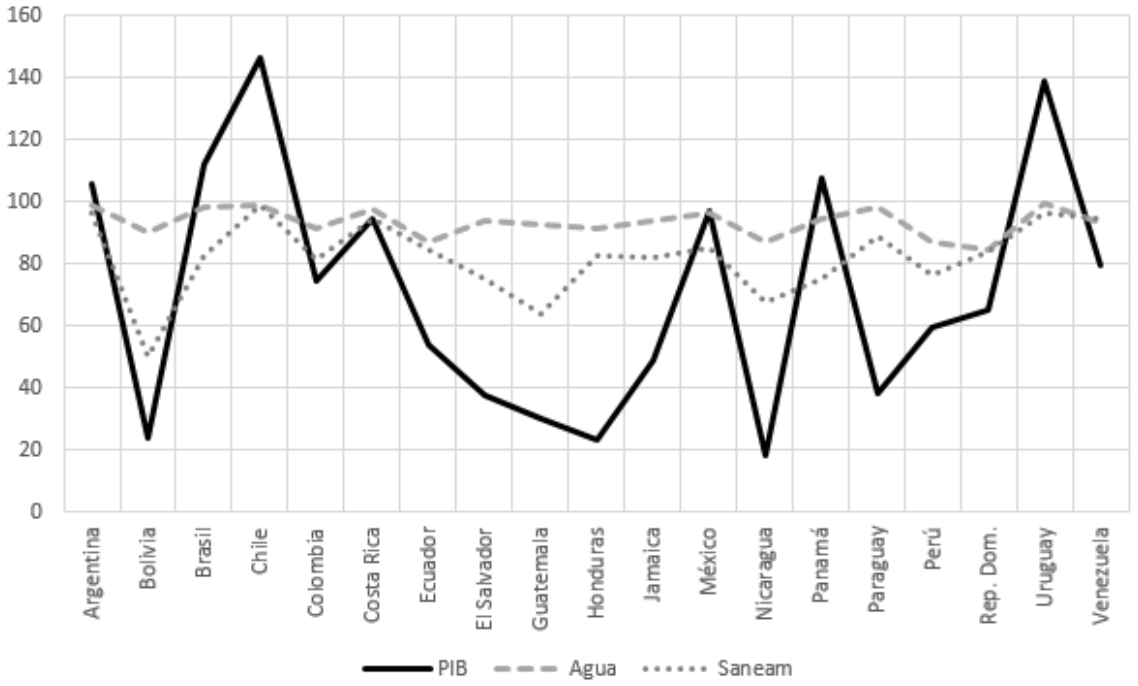


Figura 2.- Comportamiento del PIB per cápita y de la cobertura poblacional en agua y en saneamiento. Cifras nacionales a 2015.

ANÁLISIS DE LA CORRELACIÓN EN FUNCIÓN DE LA COBERTURA DEL SERVICIO DE ABASTECIMIENTO DE AGUA

Si bien el apartado previo deja entrever la relación entre el estado económico de un país y la condición de cobertura de los dos servicios públicos en agua y saneamiento, quedaba la inquietud de si estadísticamente sería la cobertura de servicios la que dependería de la condición económica y de demanda, entendida esta última en población nacional y en demanda poblacional en tugurios.

En este caso la variable dependiente es la cobertura del servicio de agua segura y las variables independientes o explicativas son: la cobertura del servicio de saneamiento, el PIB per cápita, población nacional, y la población que habita en tugurios. El resultado mostró una muy mala correlación de variables, pues el R^2 ajustado fue de -0.35 (con las cuentas nacionales resultó de 0.12) y los p-value tuvo un rango entre 0.62 y 0.92. El coeficiente de tugurios resultó positivo, lo cual no era lo esperado, pues esto implica que a mayor cantidad de habitantes en tugurios, mayor cobertura de abastecimiento de agua; situación contraria a los principios del desarrollo urbano informal.

Pero en el caso del indicador de tugurios la muestra se redujo a 12 países de 19 analizados para las demás variables (por disponibilidad de información en CEPALSTAT). Por lo tanto, se realizó nuevamente el planteamiento, pero descartando la información de tugurios. En esta ocasión se logró una mejora estadística, pero el R^2 ajustado sigue siendo insuficiente (0.32) y los p-value superan el valor 0.12.

Paso a seguir, se replanteó el modelo, pero haciendo que el valor de la constate en el modelo sea cero. El resultado fue muy favorable con un R^2 ajustado de 0.92, pero el único p-value que brinda confianza es el de la variable saneamiento (8.30x10-11). Los p-value para población y PIB, por el contrario, superaron el valor 0.11.

Los resultados obtenidos hasta el momento llevaron a generar un nuevo esquema en el que la variable dependiente sería la cobertura del abastecimiento de agua y la única variable independiente o explicativa la cobertura del servicio de saneamiento. De esta opción resultó: un R^2 ajustado similar al anterior (0.93), un p-value válido (1.14x10-17) y la ecuación 1:

$$y = (1.12 * x_1) \qquad [1]$$

Donde:

y: Proporción de la población que utiliza fuentes mejoradas de abastecimiento de agua potable, por área nacional, urbana y rural.

x_1: Proporción de la población que utiliza instalaciones de saneamiento mejoradas, por área urbana.

A pesar del correcto ajuste estadístico del modelo anterior, no es la relación de variables esperada, pues la premisa de la presente investigación es que hay un impacto de la economía y de la cantidad poblacional en el alcance de la cobertura de servicios básicos de agua y saneamiento; no que se expliquen ellas dos por sí mismas. Por ello se procede a plantear el modelo explicativo de la cobertura en saneamiento.

ANÁLISIS DE LA CORRELACIÓN EN FUNCIÓN DE LA COBERTURA DEL SERVICIO DE SANEAMIENTO BÁSICO

De manera similar al apartado anterior se procedió a correlacionar la cobertura poblacional nacional en materia de saneamiento básico a partir de: la situación económica, la cobertura del servicio de agua segura, de la cantidad poblacional nacional y de la necesidad del servicio, específicamente en condiciones de tugurios. De lo anterior no hubo buen resultado, el R^2 ajustado fue de tan solo 0.36 y los p-value estuvieron entre 0.14 y 0.92.

Luego se realizó la correlación, pero haciendo el intercepto igual a cero. Esa situación mejoró notablemente el R^2 ajustado que cambió de 0.38 a 0.87. Pero el problema persistió en el hecho de que los p-value para población, tugurios y PIB estuvieron en un rango entre 0.18 y 0.53. Solo el p-value para el agua fue válido con 0.0001. Nuevamente se relacionan las variables de cobertura de ambos servicios públicos, descartando nuevamente esta opción.

Al igual que en el apartado anterior, se procedió a trabajar eliminando la variable referente a tugurios con el fin de ampliar la muestra de 12 a 19 países. En esta ocasión la correlación no fue favorable, pues el R^2 ajustado resultó en tan solo 0.36 y solo el p-value del PIB fue inferior a 0.05 (0.03). Siendo así, se procedió a descartar la participación del agua y de la población, encontrando así una relación que no es entre los dos servicios públicos.

Al igual que con el análisis del servicio de agua, se trabajó para un modelo similar al expuesto en los párrafos anteriores, pero haciendo el intercepto de la regresión igual a cero. El resultado bajo la condición del intercepto vuelve a exponer un R^2 favorable (0.93), pero un p-value que solo es válido tanto para la variable agua como para la variable PIB, con valores inferiores a 0.05.

De acuerdo a lo encontrado se intentó con una nueva correlación empleando como variables explicativas el PIB y la cobertura poblacional en agua. Nuevamente el resultado no fue acertado, pues el R^2 ajustado mejoró levemente a tan solo 0.37, y solo el p-value del PIB se mantuvo por debajo de 0.05.

Lo anterior supone un nuevo planteamiento de modelación, empleando como única variable dependiente el PIB. Los resultados estadísticos de la correlación descartan nuevamente un posible modelo al arrojar un R^2 de tan solo 0.41.

Pero al trabajar la misma correlación con el intercepto igual a cero, se llega nuevamente a un un R^2 favorable de 0.93, y valores de p-value inferiores a 0.05. Este modelo favorable se expresa por medio de la ecuación 2:

$$y = (0.0053 * x_1) + (2.37 * 10^{-13} * x_2) \quad [2]$$

Donde:

y: Proporción de la población que utiliza fuentes mejoradas de abastecimiento de agua potable, por área nacional, urbana y rural.

x_1: Producto Interno Bruto, cuentas nacionales.
x_2: Proporción de la población que utiliza abastecimiento de agua segura, por área urbana.

La figura 3 pone de manifiesto la calibración de los modelos planteados, reflejado esto en la baja discrepancia o error gráfico entre el comportamiento real de la variable y el de los modelos (2° y 3° serie). Respecto de los modelos, con y sin el valor del intercepto igual a cero, el error o variación es relativamente bajo, y por tanto ambas expresiones o ecuaciones podrían proyectar el valor de la variable saneamiento, Sin embargo, por efectos estadísticos en las regresiones, la expresión de la ecuación 3 (con el intercepto igual a cero) presenta mejor coeficiente de correlación.

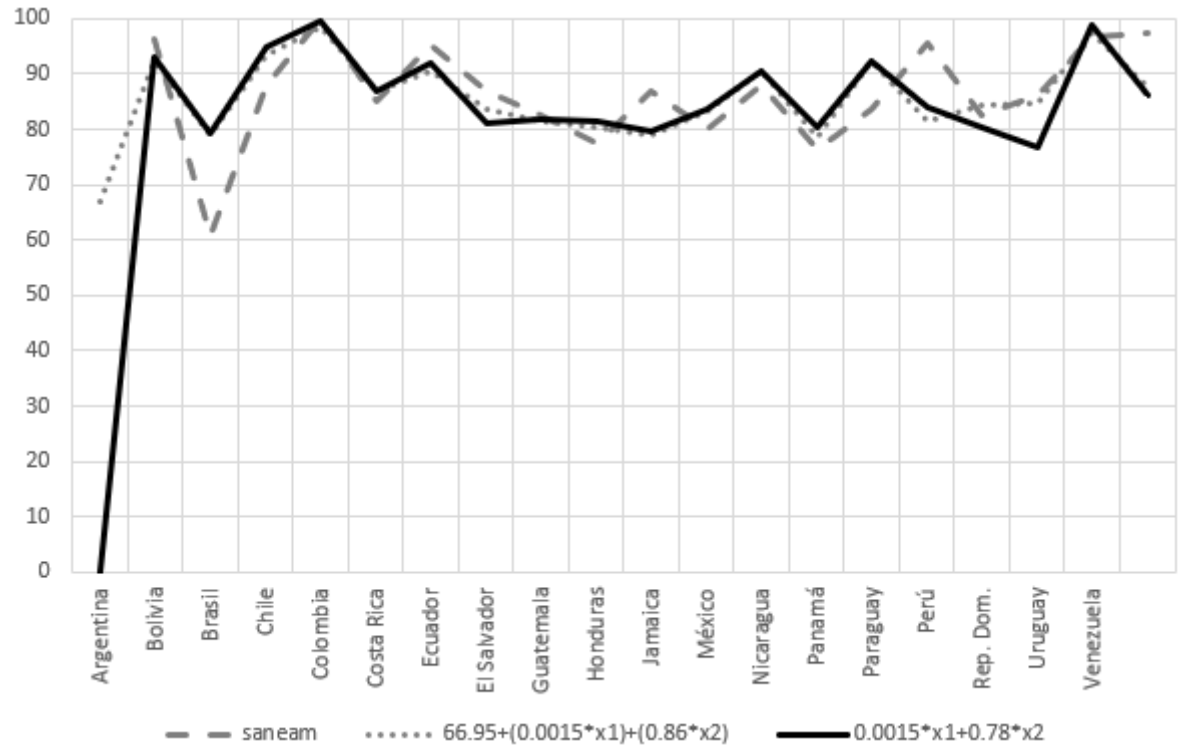


Figura 3.- Comportamiento de la cobertura poblacional en saneamiento de los registros históricos, y de las modelaciones, con el valor estimado del intercepto (2° serie) y considerando el intercepto igual a cero (3° serie). Cifras urbanas a 2015.

CONCLUSIONES

Al comparar las cuentas nacionales con las urbanas en materia de cobertura de agua y saneamiento, las nacionales tienen mayor correlación con el comportamiento del PIB. De otro lado, se observa claramente que la variable que mejor acompaña el comportamiento del PIB en cuanto a una secuencia gráfica de picos y valles es la cobertura poblacional en materia de saneamiento básico. Pero no solo se observa la mejor tendencia a nivel gráfico; los modelos planteados manifiestan una correlación válida entre la cobertura de saneamiento con el PIB y la cobertura poblacional en materia de agua segura.

En el caso rural, tal como plantea Urazán y Caicedo (2018b) “de las 4 variables en estudio (población rural, PIB per cápita nacional, cobertura poblacional rural de los servicios de agua potable y saneamiento mejorado), es la cobertura en saneamiento la que obtiene un modelo estadísticamente válido a partir del comportamiento de las otras 3”.

En Urazán y Caicedo (2018a) (cuentas nacionales), se concluye también que la variable dependiente es la cobertura del servicio de saneamiento mejorado, pero tiene como única variable independiente la cobertura del servicio de agua segura.

De otro lado, la dependencia de la cobertura del servicio de saneamiento respecto de la cantidad de poblacional rural, o demanda del servicio, y de la condición económica del país;

permite inferir que a diferencia de las cuentas nacionales, en el escenario rural es la inversión en la red de abastecimiento de agua.

Lo anterior, coincide con lo encontrado para el escenario urbano regional, en donde la extensión de las redes de saneamiento mejorado se correlaciona fuertemente con el potencial económico del país (expresado en su PIB) y con la existencia de una red de abastecimiento preexistente de agua segura, como se define en estudios como Urazán (2008) en el caso colombiano.

REFERENCIAS

Abubacar, A.; Romice, O. y Salama, A. (2017). **"**Defining slums using multidimensional and relational properties: a dynamic framework for intervention". *International journal of architectural research*. Vol. 11, No. 2, University of Stathclyde, Glasgow, p-p. 34 – 54. DOI: 10.1016/j.jue.2016.11.001.

Galiani, S.; Gertler, P.; Undurraga, R.; Cooper, R.; Martínez, S. y Ross, A. (2017). "Shelter from the storm: Upgrading housing infrastructure in Latin America slums". *Journal of urban economics*, Vol. 98, p-p. 187 – 213.

Kent, R. (2016). *Latin America. Regions and people*. 2da edición. The Guilford press, N.Y., Londres, 479 p.

Organización de las Naciones Unidas ONU (2015). *Objetivos de Desarrollo del Milenio. Avances en la sostenibilidad ambiental del desarrollo en América Latina y el Caribe*. Santiago de Chile, 231 p.

Manterola, C. y Pineda, C. (2008). "El valor de "p" y la significación estadística". *Revista chilena de cirugía*, Vol. 60, No. 1, p-p. 86-89.

Urazán, C.F. (2008). "El rol de los servicios públicos básicos en las formas de crecimiento urbano". Tesis doctoral. Barcelona, Universidad Politécnica de Catalunya.

Urazán, C.F. y Caicedo M.A. (2018a). "Modelo de correlación entre economía, población y servicios de agua y saneamiento en América Latina. Análisis de 1990 a 2015". *Revista Espacios*, Vol. 39, No. 9, marzo de 2018. ISSN: 0798-1015.

Urazán, C.F. y Caicedo M.A. (2018b). "Modelo de regresión multinomial para el análisis de cobertura de servicios agua y saneamiento en escenarios rurales de América Latina". *Revista Espacios*, Vol. 39, No. 24, junio de 2018. ISSN: 0798-1015.

IAHR AIIH
XXVIII CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA
BUENOS AIRES, ARGENTINA, SEPTIEMBREDE 2018

MODELAGEM HIDROLÓGICA DISTRIBUÍDA PARA PEQUENAS BACIAS: UMA ABORDAGEM BASEADA EM AGENTES

Juan Carlos Ticona Gutierrez; Juan Martín Bravo
Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil
juancarlos.ticonag@gmail.com; jumarbra@iph.ufrgs.br

RESUMO:

Este artigo apresenta o Modelo de Escoamento Baseado em Agentes (MEBA), o modelo tem uma abordagem de modelagem hidrológica onde se integra um sistema de informações geográficas e uma modelagem baseada em agentes, com a finalidade de representar os processos de escoamento superficial e balanço hídrico em uma bacia hidrográfica, discretizada espacialmente com células regulares. Onde cada agente representa uma camada de água do tamanho de uma célula, que se movimenta na bacia interagindo com o ambiente e outros agentes, até chegar no exutorio da bacia. Neste trabalho são apresentadas as suposições feitas para a representação dos fenômenos de escoamento e balanço hídrico atribuídas aos agentes.

PALAVRAS CHAVE: Modelo baseado em agentes, Modelagem hidrológica, sistemas multiagente

INTRODUCCIÓN

Os fenômenos naturais possuem grande complexidade, uma abordagem por meio da utilização de leis empíricas e de hipóteses destes fenômenos torna-se necessária para compreensão física do que acontece numa bacia hidrográfica. Os modelos distribuídos permitem uma análise mais criteriosa da influência das modificações que ocorrem nas bacias (Tucci, 1998). Os modelos hidrológicos distribuídos são modelos que levam em consideração a distribuição espacial da bacia através da geração de uma malha composta por pequenos elementos denominados células. Para cada célula da malha o modelo hidrológico realiza o balanço hídrico assim como a propagação dos escoamentos para outra célula (Silva et al., 2009). Com o advento do radar de tempo, os modelos chuva-vazão podem usar campos de chuva contínua para previsão de vazão quase em tempo real. Os avanços na captura e armazenamento de dados têm sido fundamentais para testar e desenvolver a nossa compreensão dos processos hidrológicos (Beven, 2015). Exemplos de modelos que integram o espaço em um relacionamento causal simples de agente são relativamente poucos. Em tais modelos, o ambiente é o único fator que rege o comportamento do agente. Os agentes adotam estratégias que lhes permitem reagir a um ambiente heterogêneo, considerando seus objetivos e ações (Parker et al., 2003). Melhorar o nível de realismo na representação do ambiente pode levar não apenas a uma compreensão aprimorada dos resultados do modelo, mas também a uma fundamentação teórica e empírica aprimorada de todo o campo da modelagem baseada em agentes (Stanilov, 2012).

OBJETIVO

Apresentar uma ferramenta computacional para auxiliar à compreensão do conceito de escoamento superficial representados em sala de aula.

METODOLOGIA

AGENTES

Uma classe de modelos que tem chamado atenção mais recentemente para a solução de diversos problemas, não apenas de engenharia, são os modelos baseados em agentes - MBA (Gilbert e Bankes, 2002; Janssen, 2005; Castle e Crooks, 2006; Macal e North, 2010; Maretto et al., 2011). Um agente pode ser uma entidade física ou virtual que possa agir, perceber seu ambiente e interagir com outros agentes, é autônomo e tem habilidades para atingir os seus objetivos e tendências. O Modelo Baseado em Agentes é um simulador de um sistema de inteligência artificial distribuída, na qual é utilizado um conjunto de componentes com comportamento próprio pré-definido, os chamados de agentes (Macal e North, 2010).

MODELO MEBA

A interface gráfica esta desenvolvida na plataforma do NetLogo (ver **Figura 5**), o objetivo deste modelo é simular o escoamento superficial ao longo de uma área geográfica, representado pelo MDE de uma bacia hidrográfica hipotética. O objetivo dos agentes apresentados neste trabalho é traçar o fluxo de água através da captação da parcela em que cai como chuva para a água, deixando a captação como escoamento, sendo infiltrada no solo ou evaporando na atmosfera e as mudanças da localização em função da topografia, como visto no fluxograma do modelo na **Figura2**.

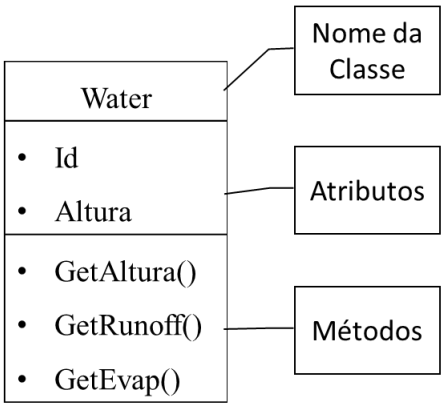


Figura 1.- Representação geral de uma classe em UML

Para permitir representar as complexidades do sistema, o modelo permite que o conjunto de objetos interagiam entre si e finalmente pode representar o fluxo de escoamento superficial através do exutorio da bacia. A estrutura geral do MEBA pode ser expressada em duas fases: escoamento, que é representado pela movimentação dos agentes e o balanço hídrico que é representada a partir de perdas de massa.

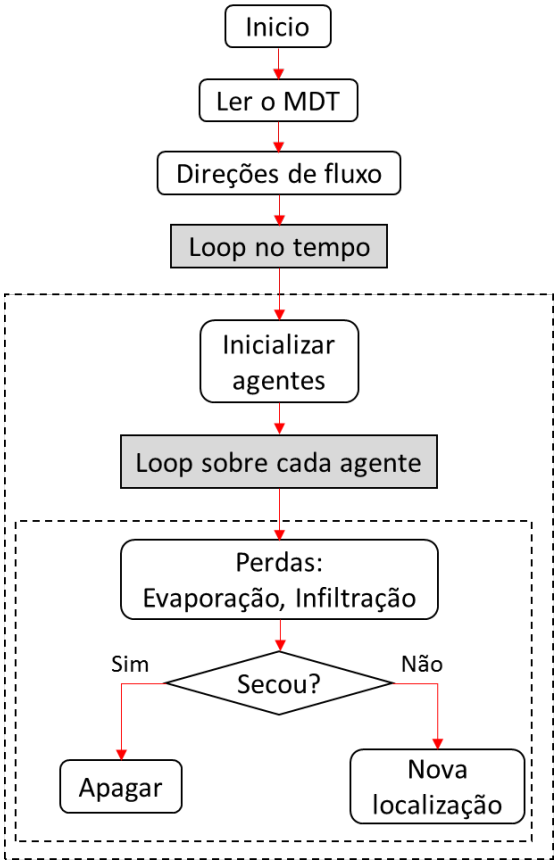


Figura2.-Fluxograma do MEBA.

MOVIMENTAÇÃO DOS AGENTES

A nova posição do agente se determina localizando da célula vizinha com uma elevação menor a posição inicial. Considerando que o agente é uma lâmina de água quadrada de altura "y" e largura "b", como na Figura 3,a velocidade média de deslocamento do agente no ambiente, se determina a partir de uma adaptação da equação de Manning [1].

$$V = \frac{1}{n} R^{2/3} s^{1/2} \qquad [1]$$

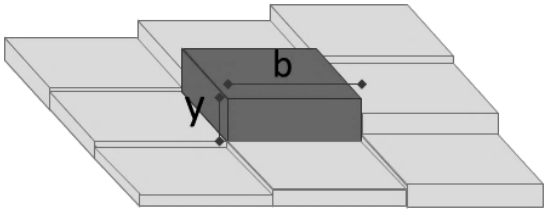


Figura 3.-Esquema do agente no ambiente.

Sendo assim, o rádio hidráulico (R) da equação de Manning, determinada usando as dimensões do agente, se pode reescrever da seguinte forma:

$$V = \frac{1}{n} \left(\frac{b.y}{b} \right)^{2/3} s^{0.5} \qquad [2]$$

Finalmente, a velocidade do agente é expressada como uma função da declividade (s), a altura da lâmina (y) e o coeficiente de Manning (n) correspondente à posição do agente, como mostrado na equação [3].

$$V = \frac{1}{n} y^{2/3} s^{0.5} \qquad [3]$$

A declividade do terreno (s) é calculada como a diferencia de elevação entre a célula nova e a célula atual (**Figura4**) dividido sobre a distância horizontal entre os centroides das células. A distância depende da direção de deslocamento do agente como se apresenta na Figura4.-Direções de movimento do agente.

, se segue uma direção cardinal a nova posição pode ser 1, 3, 5 ou 7, e a distância horizontal de deslocamento é "b"; se a direção de deslocamento é diagonal a nova posição pode ser 2, 4, 6 ou 8, a distância horizontal de deslocamento é "$b\sqrt{2}$".

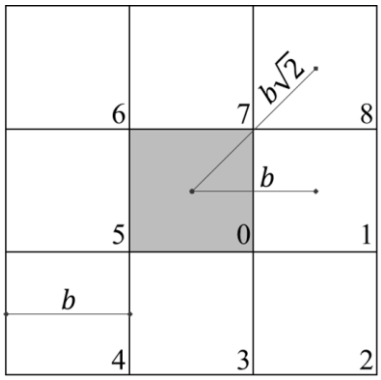


Figura4.-Direções de movimento do agente.

PERDAS DE MASSA

As perdas de massa do agente associadas a processos de evaporação e infiltração, são representadas por uma taxa de evaporação de lâmina constante e a equação do SCS, respetivamente.

$$y_{t+1} = y_t - k_{evap} \qquad [4]$$

$$Q = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a + S)} \quad \text{quando} \quad P > I_a \qquad [5]$$

Onde:y_{t+1} é a altura da lâmina de água no tempo t+1; y_t é a altura da lâmina de água no tempo t; k_{evap}é a taxa de evaporação num intervalo de tempo; Q é escoamento em mm; P é a chuva acumulada em mm; Ia são as perdas iniciais; S é o parâmetro de armazenamento em função do CN do terreno.

CONCLUSÕES

O modelo MEBA é capaz de fornecer informações detalhadas sobre as áreas previstas pelo modelo hidrológico para contribuir com o fluxo do canal durante um evento de tempestade. Essas informações incluem os caminhos de fluxo no terreno, a interação entre a infiltração e a evaporação durante o escoamento, o destino da água e a origem da água que forma o hidrograma de descarga. Usando essa abordagem, é possível realizar testes de cenário para avaliar o impacto potencial de mudanças na topografia ou na cobertura da terra. Pode-se considerar que o modelo desenvolvido e apresentado neste trabalho cumpre bem o papel como uma ferramenta educacional simples que permite ampliar o entendimento sobre processos hidrológicos.

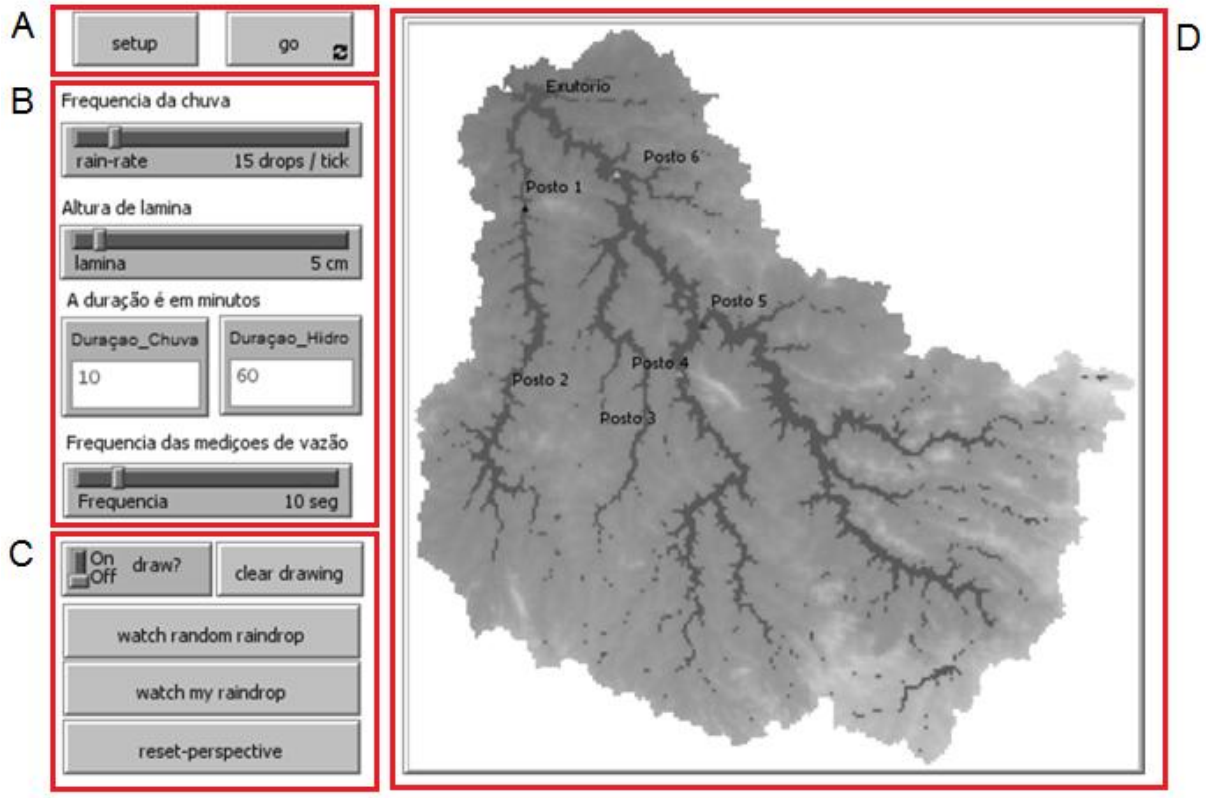


Figura 5.- Interface do MEBA: (A) Controles para executar o modelo; (B) Parâmetros da chuva e vazão; (C) Ferramentas para seguimento dos agentes; (D) Janela de interfase gráfica da bacia.

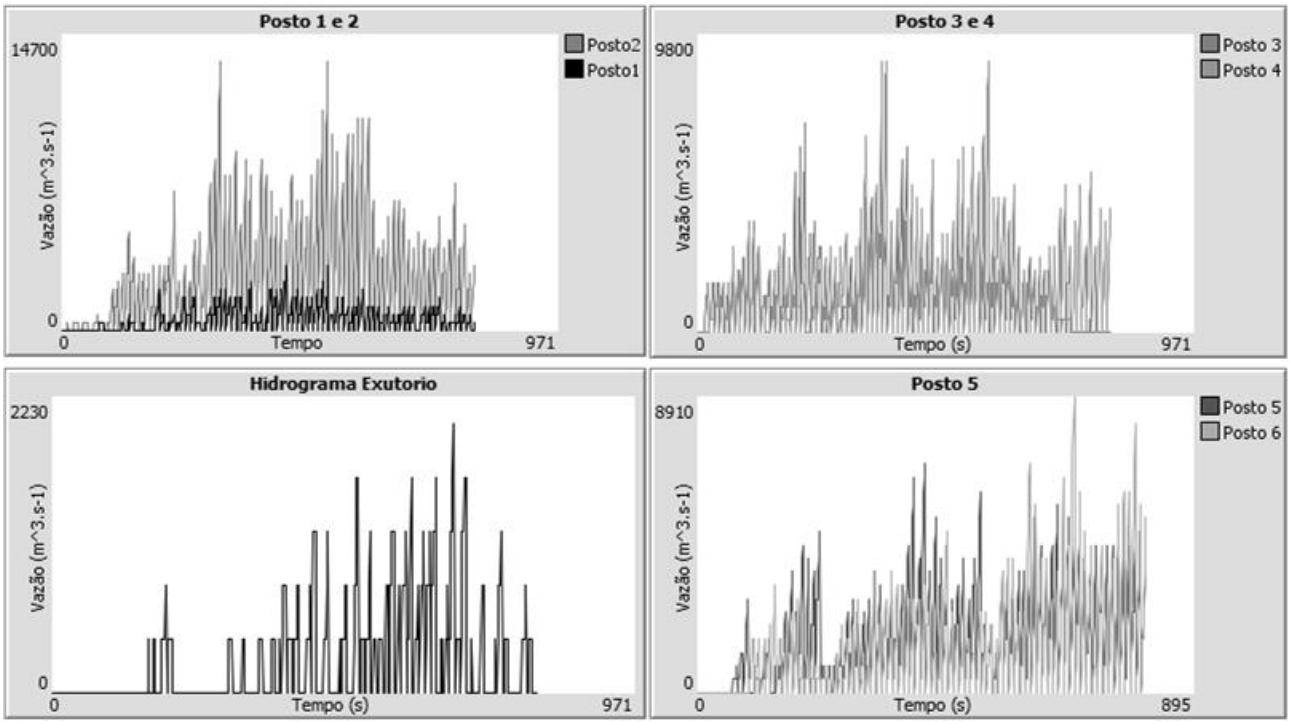


Figura 6.-Interface de saída do MEBA: Hidrógramas dos postos 1, 2, 3, 4, 5, 6 e o exutório da bacia

AGRADECIMENTOS

O primeiro autor agradece à UFRGS pela bolsa de iniciação científica concedida. Agradecemos ainda ao CNPq pelo apoio ao projeto de pesquisa no qual este trabalho se insere.

REFERENCIAS

Castle, C.J.E. and A.T. Crooks (2006). "Principles and Concepts of Agent-Based Modelling for Developing Geospatial Simulations". *Centre for Advanced Spatial Analysis (University College London)*: Working Paper 110, London, England.

Beven, K., Bathurst, J., O'Connell, E. N. D. A., Littlewood, I., Blackie, J., Robinson, M. (2015). "Hydrological modelling". *Progress in Modern Hydrology: Past, Present and Future*, 216-239.

Gilbert, N. and S. Bankes (2002). "Platforms and Methods for Agent-Based Modelling". *Proceeding of the National Academy of Sciences of the USA*, 99(3), pp. 7197–7198.

Janssen, M.A. (2005). "Agent-based modelling". *In J. Proops and P. Safonov (eds) Modeling in Ecological Economics, Edward Elgar Publishers. Edward Elgar Publising*, Cheltenham, UK, pp. 155–172.

Macal, C.M. and M.J. North (2010)."Tutorial on agent-based modelling and simulation". *Journal of Simulation,* 4, pp. 151-162.

Parker, D. C.; Manson, S. M.; Janssen, M. A.; Hoffmann, M. J.; Deadman, P. (2003). "Multi-agent systems for the simulation of land-use and land-cover change: a review". *Annals of the association of American Geographers*, 93(2), pp. 314-337.

Silva, R.V.; Kobiyama, M.; Yamashiki, Y.; Takara, K. (2009). "Investigation of geomorphological properties using Voronoi discretization". *Kyoto Daigaku Bosai KenkyujoNenpo*, Vol. 52, pp. 83-89.

Stanilov, K. (2012). "Space in agent-based models". *In: Agent-based models of geographical systems,* Springer, Dordrecht, pp. 253-269.

Tucci, C.E.M. (1998). "Modelos hidrológicos". *Associação Brasileira de Recursos Hídricos,* Porto Alegre: Ed. Universidade: UFRGS, p. 669.

IAHR **AIIH**

XXVIII CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA
BUENOS AIRES, ARGENTINA, SEPTIEMBRE DE 2018

UMA FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA ENSINO NA ÁREA DE MODELAGEM ECOLÓGICA DE COMUNIDADES AQUÁTICAS

Leonardo Facini Fernandes, Juan Martín Bravo, Juan Carlos Ticona, Lúcia Helena Ribeiro Rodrigues, David da Motta Marques

Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil
leonardo.facini@gmail.com; jumarbra@iph.ufrgs.br ; juancarlos.ticonag@gmail.com; lucia.rodrigues@ufrgs.br; dmm@iph.ufrgs.br

RESUMO:
As disciplinas na área de ecologia e limnologia apresentam conteúdos relacionados a comunidades aquáticas e sua estrutura. Estes conteúdos são encontrados em grande número de bibliografias sendo o objetivo deste trabalho apresentar um modelo educacional para auxiliar o estudo de fenômenos facilitando a compreensão dos conteúdos. O modelo permite ao aluno ou usuário testar facilmente diferentes cenários, parametrizações, e visualizar em tempo real a consequência de cada alteração induzida no ecossistema. O modelo foi denominado EcoAula-IPH, sendo representados os principais constituintes da cadeia trófica em comunidades aquáticas: fitoplâncton, zooplâncton, peixe zooplanctivoro, peixe onívoro e peixe piscívoro. O programa utiliza como dados de entrada séries temporais de cinco variáveis: oxigênio dissolvido, temperatura da água, luz, concentrações de nitrogênio e fósforo, e simula a evolução das interações dos constituintes em um tanque retangular estanque. Diferentes aplicações foram avaliadas como por exemplo, preferência de cardumes de peixes por regiões favoráveis em função da resposta funcional, influência da temperatura no crescimento da biomassa de fitoplâncton e comportamento presa-predador. Em todos as aplicações, o modelo mostrou de forma condizente os resultados esperados, se apresentando como uma ferramenta didática, de uso público, e fácil de utilizar, com grande potencial de ser utilizada em salas de aula em disciplinas da área de recursos hídricos e ecologia.

ABSTRACT:
The ecology and limnology courses have several contents related to aquatic communities and their structure. These contents are found in a large number of bibliographies and the objective of this work is to present an educational model to help the study of these topics. The developed model allows the student or other user to easily assess different scenarios, parameterizations, and visualize in real-time the consequences of each induced modification on the ecosystem. The model was called EcoAula-IPH and was represented the main constituents of the trophic level in aquatic communities: phytoplankton, zooplankton, planktivorous fishes, omnivorous fishes and piscivorous fishes. The program uses as input data the time series of five variables: dissolved oxygen, water temperature, light, nitrogen and phosphorus concentration, and simulates the evolution of the interactions of the constituents in a rectangular pond. Different applications were evaluated, as for example, fishery preference for favorable habitat regions, temperature influence on phytoplankton biomass growth and prey-predator behavior. In all applications, the model showed the expected results in a suitable way, presenting itself as a didactic tool of public use, and easy to use, with remarkable potential to be used in classrooms.

PALAVRAS-CHAVES: Modelo educacional; Modelagem comunidades aquáticas; Modelagem baseada em agentes.

INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de ferramentas educacionais permite a difusão do conhecimento e facilita o entendimento de princípios ou fenómenos complexos. Na área de ecologia de comunidades aquáticas, os processos biológicos de grupos de organismos e suas interações na comunidade aquática são conceitos apresentados em diferentes disciplinas de cursos das engenharias (e.g. Civil, Ambiental, Recursos Hídricos), Ecologia, Agronomia, Zootecnia. A modelagem matemática em ecologia utiliza diferentes abordagens, entretanto os modelos de simulação que descrevem organismos individuais ou, em geral, "agentes", se tornaram uma ferramenta amplamente utilizada (DeAngelis e Mooij, 2005; Grimm, 1999; Grimm e Railsback, 2005; van Winkle et al., 1993).

Os modelos baseados em indivíduos (MBIs) são mais adequados para lidar com a variabilidade individual que é tão importante nestas comunidades (van Nes et al., 2003). No entanto, a utilização de MBIs na modelagem de comunidades aquáticas pode resultar inviável pelo excessivo esforço computacional para representar o grande número de indivíduos (Hellweger, 2008). Alternativamente existem os modelos baseados em super-indivíduos (MBSI) que avaliam os efeitos de grupos ou classes de organismos sobre a dinâmica populacional. A unidade básica do MBSI é um super-indivíduo, entendido como uma classe de organismos similares de acordo com um ou vários critérios ecológicos. A abordagem de super-indivíduos é uma ferramenta poderosa quando se trata de reduzir a carga computacional de executar MBIs complexos, mantendo uma alta precisão (Scheffer et al., 1995).

Nesse trabalho é apresentado um MBSI e um conjunto de aplicações para demonstrar a capacidade de explorar conceitos de dinâmica de comunidades aquáticas em forma didática para alunos de graduação de diferentes cursos.

OBJETIVO

Analisar a utilidade de uma ferramenta computacional na área de modelagem ecológica de ecossistemas aquáticos para auxílio à compreensão dos conceitos ou fenômenos representados em sala de aula em disciplinas de graduação.

O MODELO ECOAULA-IPH

O modelo EcoAula-IPH (Fernandes et al., *submetido*) foi desenvolvido no software livre NetLogo, específico para o desenvolvimento de simulações baseadas em agentes de fenômenos naturais e sociais.

Cinco grupos em comunidades aquáticas foram representados como super-indivíduos: fitoplâncton, zooplâncton e peixes zooplanctívoros, onívoros e piscívoros. O programa utiliza como dados de entrada séries temporais de cinco variáveis: oxigênio dissolvido, temperatura, radiação solar, nitrogênio e fósforo e simula a evolução das concentrações de cada grupo em um tanque retangular estanque. Enquanto o fitoplâncton e o zooplâncton foram simulados com uma representação de autômatos celulares em uma rede de 100 células quadradas, os grupos de peixes foram representados por super-indivíduos cujos movimentos são definidos por gradientes de índices de adequabilidade de habitat calculados em cada intervalo de tempo para as células vizinhas à localização atual do agente. A estimativa da taxa de crescimento ou decaimento das biomassas é baseada na equação de Lotka-Volterra modificada para lidar com múltiplos organismos.

Duas alternativas para o cálculo de índice de adequabilidade de habitat foram incluídas no modelo, como apresentado, por exemplo, em Dueri et al. (2012): Método aditivo, onde a resposta funcional dos peixes sob a influência de cada uma das variáveis é somada para obter o valor do índice em cada célula do modelo e, o Método multiplicativo, onde cada resposta funcional é

multiplicada pelas restantes na estimativa do valor do índice em cada célula do modelo. Os plugs existentes nessas expressões (equação 1 e equação 2) permitem ao usuário ativar ou desativar a percepção de algumas das variáveis, enquanto que os valores dos expoentes permitem aumentar ou diminuir a importância da variável na tomada de decisão do peixe.

$$IAH_A_i = p_{luz} * {I_{luz_i}}^{exp_{luz}} + p_{tem} * {I_{tem_i}}^{exp_{tem}} + p_{OD} * {I_{OD_i}}^{exp_{OD}} + p_{Pred} * {I_{Pred_i}}^{exp_{Pred}} + p_{Pres} * {I_{Pres_i}}^{exp_{pres}} \quad [1]$$

$$IAH_M_i = p_{luz} * {I_{luz_i}}^{exp_{luz}} * p_{tem} * {I_{tem_i}}^{exp_{tem}} * p_{OD} * {I_{OD_i}}^{exp_{OD}} * p_{Pred} * {I_{Pred_i}}^{exp_{Pred}} * p_{Pres} * {I_{Pres_i}}^{exp_{pres}} \quad [2]$$

onde: IAH_A_i é o valor do índice de adequabilidade de habitat aditivo na célula i, IAH_M_i é o valor do índice de adequabilidade de habitat multiplicativo na célula i, p_{luz} é o plug que permite ativar (valor 1) ou desativar (elimina termo da equação) a percepção da luz, I_{luz} é o valor (entre 0 e 1) da resposta funcional dos indivíduos à iluminação, exp_{luz} é o valor do expoente no termo da luz (valor maior ou igual que um), p_{tem} é o plug que permite ativar (valor 1) ou desativar (elimina termo da equação) a percepção da temperatura da água, I_{tem} é o valor (entre 0 e 1) da resposta funcional dos indivíduos à temperatura da água, exp_{tem} é o valor do expoente no termo da temperatura da água (valor maior ou igual que um), p_{OD} é o plug que permite ativar (valor 1) ou desativar (elimina termo da equação) a percepção do oxigênio dissolvido, I_{OD} é o valor (entre 0 e 1) da resposta funcional dos indivíduos ao oxigênio dissolvido, exp_{OD} é o valor do expoente no termo do oxigênio dissolvido (valor maior ou igual que um), p_{Pred} é o plug que permite ativar (valor 1) ou desativar (elimina termo da equação) a percepção de predadores e permitir a fuga da presa, I_{Pred} é o valor (entre 0 e 1) da resposta funcional dos indivíduos à presença de predadores, exp_{Pred} é o valor do expoente no termo de percepção de predadores (valor maior ou igual que um), p_{Pres} é o plug que permite ativar (valor 1) ou desativar (elimina termo da equação) a percepção de presas, I_{Pres} é o valor (entre 0 e 1) da resposta funcional dos indivíduos à presença de presas, exp_{Pres} é o valor do expoente no termo de percepção de presas (valor maior ou igual que um),

O EcoAula-IPH apresenta uma interface gráfica amigável (Figura 1) onde o usuário pode ajustar diversos parâmetros da simulação, e.g., o número de super-indivíduos existentes associados a peixes, a biomassa inicial de cada um deles, biomassa inicial de fitoplâncton e zooplâncton, a percepção dos peixes para diversos fatores que influenciam a tomada de decisão enquanto locomoção. Os resultados são apresentados em animações da movimentação dos grupos de peixes e em gráficos de evolução temporal de concentrações.

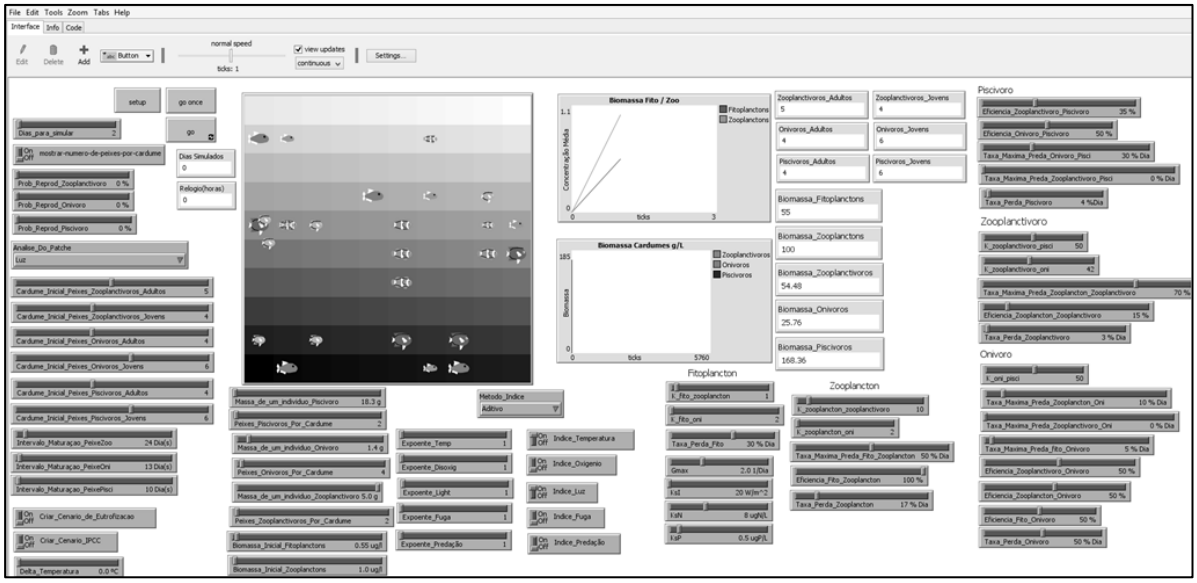


Figura 1.- Interface do modelo EcoAula-IPH

APLICAÇÕES DO MODELO ECOAULA-IPH

Cinco aplicações do modelo EcoAula-IPH são apresentadas a seguir para demonstrar a aplicabilidade do modelo na apresentação de diversos conteúdos relacionados a comunidades aquáticas em disciplinas de cursos de graduação.

Em todas as aplicações foi considerado um intervalo de tempo de 15 segundos.

A primeira aplicação considerou verificar a movimentação de peixes na coluna líquida em uma situação de estratificação térmica, onde na superfície (epilímnio) a água apresenta temperatura maior que na região do fundo (hipolímnio). Para a simulação, a temperatura da água variou de 18ºC (células no fundo) até 22,5ºC (células na superfície) se mantendo constante em cada célula ao longo do período. A resposta funcional dos peixes considerou apenas a temperatura da água com base na curva apresentada na Figura 2, que define a temperatura de 20°C como a situação ideal.

A segunda aplicação considerou verificar o aumento de biomassa fitoplanctônica com o aumento da temperatura da água. Nesse sentido foi feita uma simulação considerando temperatura atual de 20°C ao longo de um período de dois dias sem considerar predação. Na sequencia cinco simulações foram feitas aumentando o valor da temperatura atual em 0,5; 1; 1,5; 3 e 5°C mantendo os restantes parâmetros igual à simulação do período atual, no período de tempo de dois dias.

A terceira aplicação apresentou o comportamento presa-predador ao considerar na estimativa do índice de adequabilidade de habitat apenas ativos os plugs de percepção de predadores e de percepção de presas, considerando a presença de todos os grupos de peixes, fitoplâncton e o zooplâncton. Nesta aplicação outras variáveis do ambiente não influenciam a tomada de decisão dos peixes, que apenas se baseia na percepção de alimento (células com maior quantidade são preferidas) ou na presença de predadores (células com predadores não são escolhidas).

A quarta e quinta aplicações mostram a diferença resultante na movimentação dos peixes em função da escolha do método de cálculo do índice de adequabilidade de habitat, pelo método aditivo (quarta aplicação) e pelo método multiplicativo (quinta aplicação). Em ambos os casos foram considerados ativos os plugs das variáveis: temperatura da água, percepção de predadores e percepção de presas. O valor dos expoentes adotados nas três variáveis foi a unidade.

RESULTADOS

A Figura 2 mostra o resultado da movimentação dos peixes considerando na resposta funcional apenas a temperatura da água (Aplicação 1). Os peixes direcionam-se para a parte central

do sistema no decorrer do tempo, onde encontram valores de temperatura de água mais propícios para sua subsistência e desenvolvimento, conforme a curva de resposta funcional.

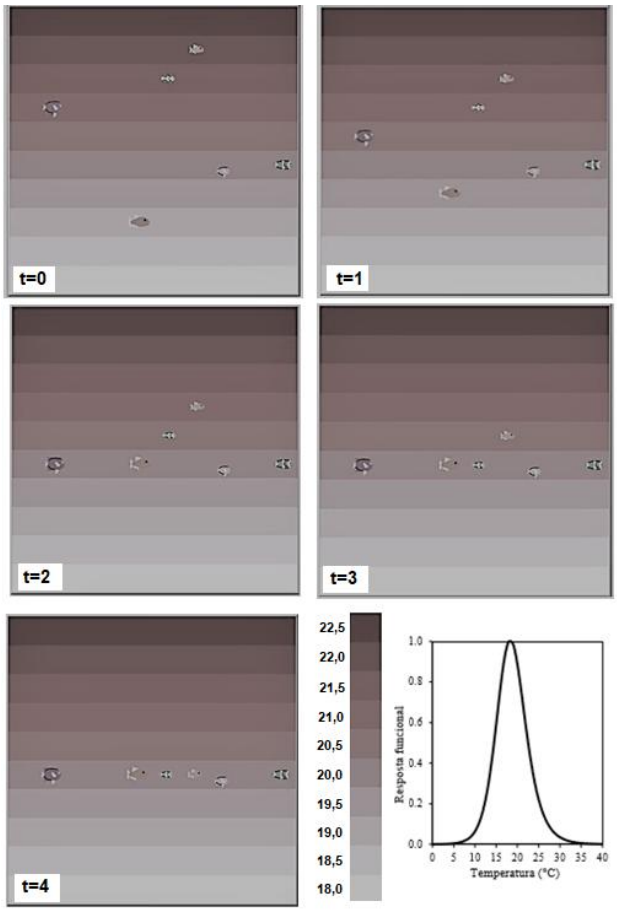


Figura 2.- Resultados da movimentação de peixes considerando apenas o campo de temperatura da água e a curva de resposta funcional indicada.

Por sua vez, a Figura 3 mostra a evolução da biomassa fitoplanctônica no sistema ao longo de dois dias de simulação considerando valores de temperatura da água crescente e sem considerar a predação (Aplicação 2). Para o valor de temperatura atual, a biomassa fitoplanctônica praticamente duplica ao longo de dois dias na ausência de predação. Conforme se observa na Figura 3, valores crescentes de temperatura da água levaram a maiores aumentos da produção fitoplanctônica na ausência de predação, pudendo praticamente triplicar o valor de biomassa inicial para a parametrização utilizada nesta aplicação.

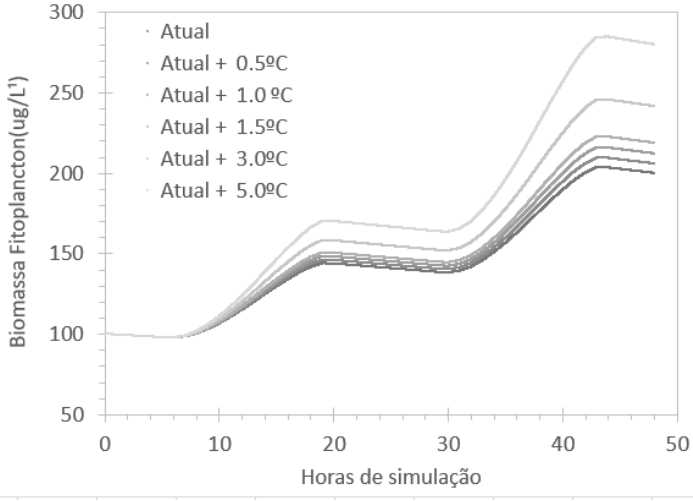


Figura 3.- Evolução da biomassa fitoplanctônica para diferentes temperatura da água e sem predação.

Os resultados da terceira aplicação são apresentados na Figura 4. Cada agente apresentado nessa figura representa um cardume de peixes de um dado grupo (zooplanctívoro, onívoro ou piscívoro) e, em consequência, com preferencias diferentes quanto a predação. Os peixes zooplanctívoros procuram seres planctônicos (fito e zoo) que se encontram espalhados no sistema existindo uma dada concentração em cada célula. Os peixes onívoros predam seres planctónicos e peixes zooplanctívoros, enquanto que os peixes piscívoros se alimentam dos outros grupos de peixes. Como apenas a percepção de pressas e predadores foi ativada nessa simulação, os peixes piscívoros permanecem imóveis até que o campo do índice de adequabilidade de habitat seja alterado ao seu redor pela presença de uma presa, conforme observado em diferentes intervalos de tempo da Figura 4. Os peixes onívoros e zooplanctívoros se movimentam continuamente em função da disponibilidade de fitoplancton e zooplancton existente no sistema. No entanto, quando da presença de predadores em células vizinhas, estes são evitados, emergindo um comportamento de perseguição também observado na Figura 4.

É importante ressaltar nos resultados apresentados na Figura 4 que a presença de uma presa e um predador na mesma célula não necessariamente significa a eliminação da presa, pois cada agente representa um cardume vinculado a uma biomassa total resultante de um conjunto de indivíduos. Dessa forma, a pesar da predação, biomassa ainda pode existir no agente. Quando a biomassa chega a zero, nesse instante o agente é eliminado do sistema.

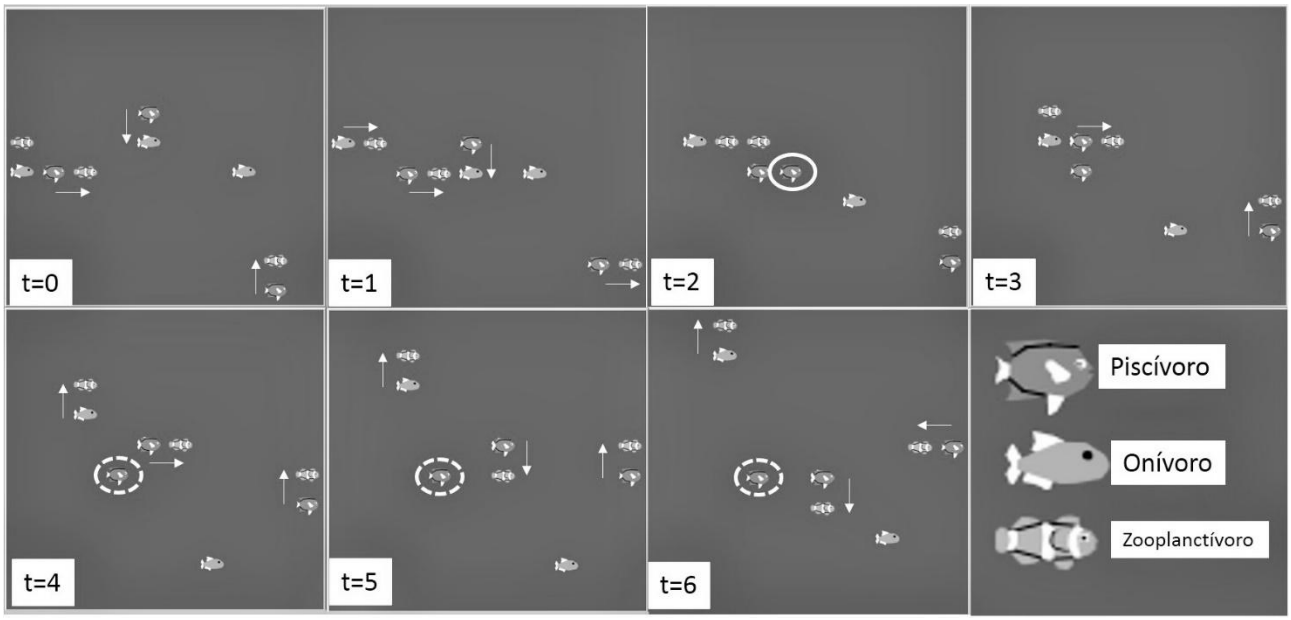


Figura 4.- Comportamento presa-predador na simulação da aplicação 3, primeiros seis intervalos de tempo.

Por fim, nas duas últimas aplicações foi testada a influência da escolha do método de cálculo de índice de adequabilidade de habitat. Os resultados são apresentados na Figura 5 (método aditivo) e na Figura 6 (método multiplicativo).

Quando da utilização do método aditivo as respostas funcionais para cada variável consideradas são somadas, e por isto mesmo existindo uma resposta funcional igual a zero (por exemplo, a não existência de presa), o índice de adequabilidade de habitar continua apresentando valores maiores que zero pelas restantes respostas funcionais vinculadas às variáveis do habitat. Diferentemente, quando da utilização do método multiplicativo, qualquer resposta funcional que resulte igual a zero provoca que o índice de adequabilidade de habitat também resulte zero, mantendo os agentes imóveis pela inexistência de gradientes de índices de adequabilidade de habitat entre a célula atual e as células vizinhas.

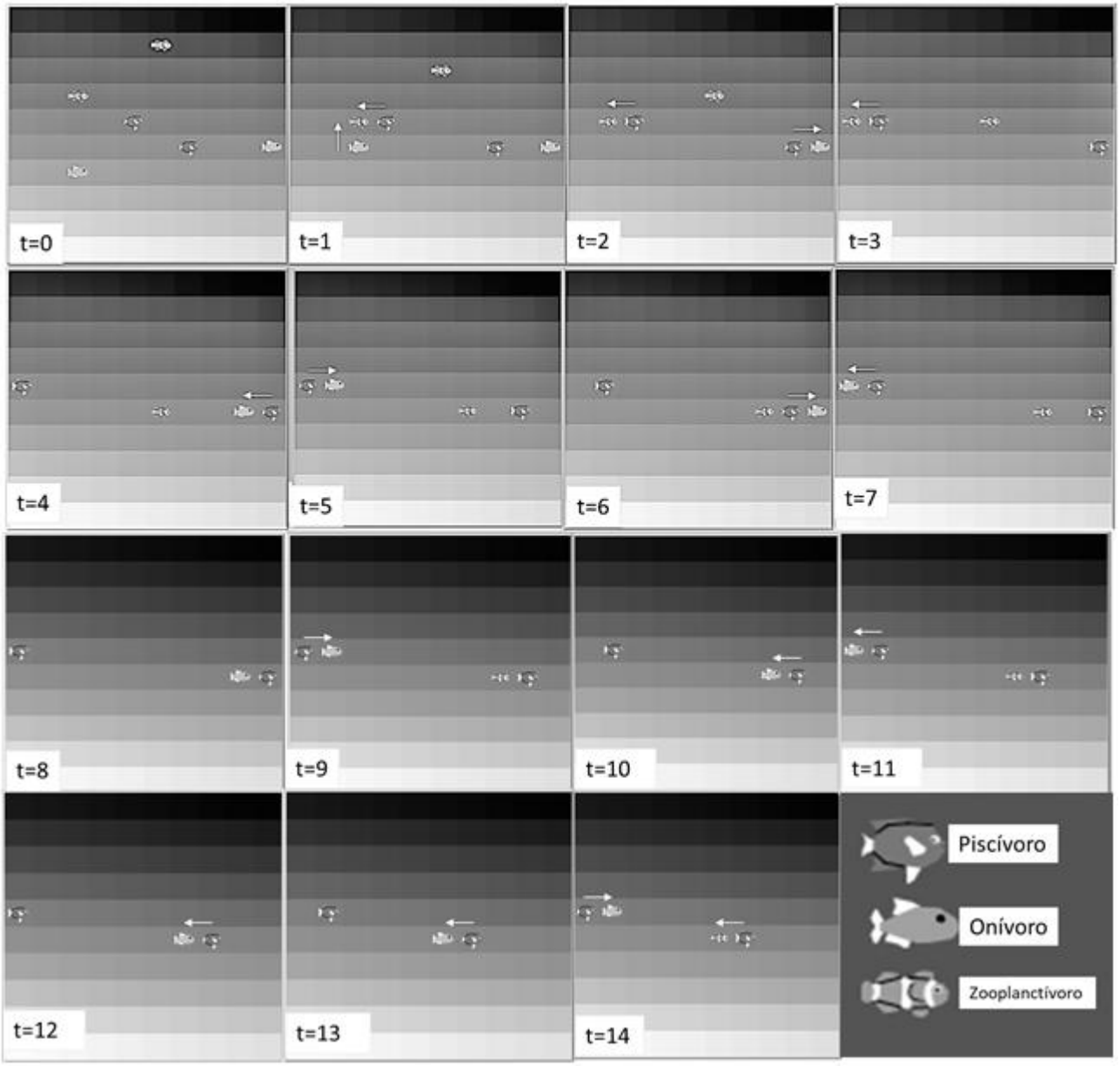


Figura 5.- Resultado da movimentação de peixes em 15 intervalos de tempo quando utilizado o método aditivo na estimativa do índice de adequabilidade de habitat (Aplicação 4).

Da comparação dos resultados apresentados na Figura 5 e na Figura 6, a influência da escolha do método de calculo do índice de adequabilidade de habitat fica mais evidente nos cardumes de peixes piscívoros. Enquanto na Figura 5 (método aditivo) os cardumes de peixes piscívoros estão em constante movimento em direção à região mais favorável em termos de temperatura da água (região central do sistema) e ao mesmo tempo de disponibilidade de presas, na Figura 6 (método multiplicativo) os cardumes de peixes piscívoros permanecem imóveis até o intervalo de tempo t = 4. Nesse intervalo de tempo um cardume de peixes zooplanctívoros altera o campo de índices de adequabilidade de habitat dos peixes piscívoros ao passar por célula vizinha à posição atual do cardume de peixes piscívoro. No intervalo de tempo t = 5 da Figura 6 também pode ser observado o agrupamento de cardumes, situação considerada quando do encontro de dois agentes do mesmo grupo de peixes (piscívoros neste exemplo) na mesma célula, sendo estes agrupados em um único agente com biomassa igual à soma da biomassa dos agentes anteriores.

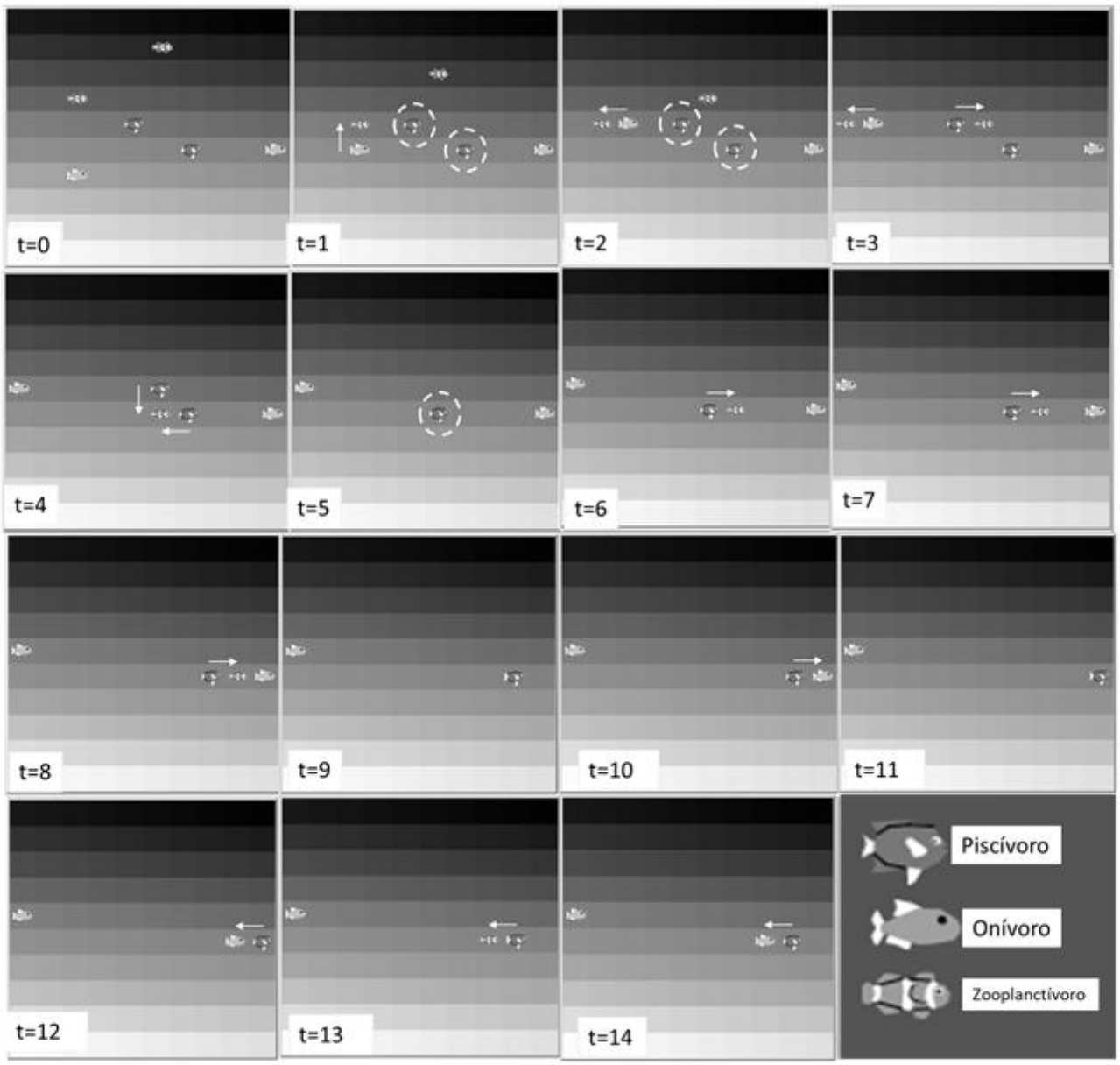


Figura 6.- Resultado da movimentação de peixes em 15 intervalos de tempo quando utilizado o método multiplicativo na estimativa do índice de adequabilidade de habitat (Aplicação 5).

CONCLUSÕES

Foi possível representar com a modelagem baseada em agentes os principais processos do ecossistema aquático, através de uma ferramenta que se mostra didática, de uso público, e fácil de utilizar, com grande potencial de ser utilizada em salas de aula em disciplinas da área de recursos hídricos e ecologia.

As aplicações testadas demonstraram a correta representação dos processos modelados em todos os casos avaliados.

AGRADECIMENTOS

O primeiro autor agradece à UFRGS pela bolsa de iniciação científica concedida. Agradecemos ainda ao CNPq pelo apoio ao projeto de pesquisa no qual este trabalho se insere.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

DeAngelis, D.L., Mooij, W.M. (2005). "Individual-Based Modeling of Ecological and Evolutionary Processes". *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, Vol. 36:1, pp. 147-168.

Dueri, S., Faugeras, B., Maury, O. (2012). "Modelling the skipjack tuna dynamics in the Indian Ocean with APECOSM-E: Part 1. Model formulation". *Ecological Modelling*, Vol. 245, pp. 41-54.

Fernandes, L.F, Bravo, J.M., Ticona, J.C.; Rodrigues, L.R; Marques, D.M (submetido-2018). "Avaliação visual e numérica da interação entre grupos de indivíduos na modelagem ecológica de comunidades aquáticas". *Engenharia Sanitária e Ambiental*.

Grimm V., Railsback S.F. (2005). *Individual-based Modeling and Ecology*. Princeton: Princeton University Press.

Grimm, V. (1999). "Ten years of individual-based modelling in ecology: What have we learned, and what could we learn in the future?". *Ecological Modelling*, Vol. 115, pp. 129-148.

Hellweger, F.L. (2008). "Spatially explicit individual-based modeling using a fixed super-individual density". *Computers & Geosciences*, Vol. 34, pp. 144–152.

Scheffer, M., Baveco, J.M., DeAngelis, D.L., Rose, K.A., van Nes, E.H. (1995). "Super-individuals a simple solution for modelling large populations on an individual basis". *Ecological Modelling*, Vol. 80, pp. 161–170.

van Nes, E.H., Scheffer, M., van den Berg, M.S., Coops, H. (2003). "Charisma: a spatial explicit simulation model of submerged macrophytes". *Ecological Modelling*, Vol.159, pp. 103-116.

van Winkle, W., Rose, K.A., Chambers, R.C. (1993). "Individual-based approach to fish population dynamics: an overview". *Transactions of American Fisheries Society*, Vol. 122, pp. 397-403.

RESULTADOS DE LAS ACCIONES DE EFICIENCIA DE 4 ORGANISMOS DE AGUA POTABLE DE LA CUENCA DEL LAGO DE PÁTZCUARO, MICHOACÁN, MÉXICO.

Edgar Antúnez Leyva[1], José M. Rodríguez Varela[1], Jorge A. Casados Prior[1], Luis Gómez Lugo[1] y M. Patricia Hansen Rodríguez[1]

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Sub-coordinación de Hidráulica Urbana.
Paseo Cuauhnáhuac No. 8532, Col. Progreso, Jiutepec, Morelos, México.
eantunez@tlaloc.imta.mx, manuel_rodriguez@tlaloc.imta.mx, jorgecadasos@tlaloc.imta.mx, lgomez@tlaloc.imta.mx, phansen@tlaloc.imta.mx

RESUMEN:

En México los Organismos Operadores de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento (OOAPAS) son las entidades encargadas de prestar los servicios municipales de agua potable, alcantarillado y saneamiento a la población, sin embargo, no es tarea fácil dado el constante crecimiento demográfico y la demanda de los servicios, por ello los OOAPAS se ven minimizados en infraestructura y capacidad operativa, como caso particular se presenta lo sucedido en la ribera del Lago de Pátzcuaro, Michoacán, México. Cabe hacer mención que el Lago de Pátzcuaro está rodeado por los Municipios de Quiroga, Erongarícuaro, Pátzcuaro y Tzintzuntzan, responsables directos del cuidado del emblemático Lago. El Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) realizó el presente trabajo con recursos de la Fundación Gonzalo Río Arronte I. A. P. (FGRA) en el Marco del Programa para la Recuperación Ambiental de la Cuenca del Lago de Pátzcuaro (etapa IV 2014-2017), el objetivo del presente trabajo fue involucrar al Programa las instancias Federales, Estatales y Municipales a fin de consensuar las líneas de acción y potenciar recursos económicos para que los organismos ribereños del Lago de Pátzcuaro estén en posibilidades de alcanzar la sustentabilidad en el mediano y largo plazo.

ABSTRACT:

In Mexico organizations operators of drinking water, drainage and sanitation are the entities responsible for providing municipal water, drainage, and sanitation services to the population, however it is not an easy task given the constant population growth and the demand for services, therefore organizations operators are minimized in infrastructure and operational capacity, as particular case arises what happened on thebanks of the Lake of Pátzcuaro, Michoacán, Mexico. Is important to mentionthatthe Lake of Patzcuaroissurroundedbythemunicipalities of Quiroga, Erongarícuaro, Pátzcuaro and Tzintzuntzan, directly responsible for the care of the emblematic Lake. The Mexican Institute of water technology performed thisworkwithresources of the Fundación Gonzalo Rio Arronte I. A. P. (FGRA) in the framework of the Program for theEnvironmentalRecuperation of the Lake Pátzcuaro Basin (stage IV 2014-2017), the objective of the present study was to involve program instances federal, State, and municipal in order to agree on the lines of action and enhance economic resources to makecoastalorganisms of Lake Pátzcuaro onpossibilities of achieving sustainability in the medium and long term.

INTRODUCCIÓN

El Programa para la Recuperación Ambiental de la Cuenca del Lago de Pátzcuaro inicia con la firma del Convenio General de Colaboración, el día 26 de febrero de 2003 en Napizaro, Erongarícuaro, Michoacán, entre los gobiernos municipales de Pátzcuaro, Erongaricuaro, Tzintzuntzan y Quiroga, el gobierno del Estado de Michoacán de Ocampo, la Fundación Gonzalo Río Arronte (FGRA) y el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). En el programa se han desarrollado las siguientes etapas: la primera etapa de febrero de 2003 a mayo de 2004, la segunda etapa fase 1 de junio de 2004 a noviembre de 2005, la segunda etapa fase 2 de enero de 2006 a diciembre de 2007, la tercera etapa de mayo de 2008 a diciembre de 2012 y la cuarta y última etapa de enero de 2014 a diciembre de 2017, como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1.- Etapas del Programa para la Recuperación Ambiental de la Cuenca del Lago de Pátzcuaro.

Etapa	Duración	Años	Número de proyectos
Primera etapa	2003 – 2004	2	13
Segunda etapa – primera fase	2004 – 2005	2	25
Segunda etapa – segunda fase	2006 – 2007	2	15
Tercera etapa	2008 – 2012	4	20
Cuarta etapa	**2014 – 2017**	**4**	**9**
	TOTALES	**14**	**82**

El objetivo general del programa se sustenta en una serie de proyectos y acciones, cuya aplicación permitirá incrementar y mejorar la conciencia y cultura ambiental entre los pobladores de la cuenca, lograr el consensó con respecto a los problemas prioritarios y sus soluciones, profundizar el conocimiento de la disponibilidad de los recursos naturales y sus usos, establecer criterios para priorizar acciones y canalizar inversiones que garanticen la recuperación ambiental de la región, así como llevar a cabo proyectos ejecutivos que generan beneficios tangibles a la cuenca.

Los problemas de contaminación, la falta de extracción de maleza acuática, la deforestación y por consecuencia los azolves en el lago, han repercutido de manera importante en la calidad del agua. La situación de la cuenca antes de dar inicio al Programa para la Recuperación Ambiental de la Cuenca del Lago de Pátzcuaro era muy crítica ya que el Lago presentaba índices de contaminación y disminución del nivel del agua debido a la tala clandestina, la expansión de la superficie agrícola, la sobreexplotación de especies exóticas provocando la amenaza hacia especies endémicas como el pez blanco y la acúmara. Otro problema importante era el aporte de sedimentos con una evidente tendencia hacia el azolve de sus zonas litorales, además de verse afectada por las prácticas inadecuadas del uso del suelo donde el aprovechamiento forestal, la agricultura y el pastoreo son incompatibles y destructivos, mientras que, en el caso del lago, el uso del suelo, el vertido a las aguas de desecho, además del azolve, acelera la degradación del sistema acuático.

Se identificaron 5 líneas de acción en la cuenca:

1. Cultura del agua.
2. Gestión sustentable de cuerpos, cauces y cuencas.
3. Tecnología, eficiencia, y optimización del uso del agua.
4. Proyectos comunitarios.
5. Fortalecimiento y desarrollo de organizaciones ejecutoras.

Todos los proyectos/acciones que se plantearon en el programa para la cuarta etapa (ver listado siguiente) son continuidad de los proyectos generados en las etapas anteriores, provenientes del ejercicio de planeación estratégica que resultó en la primera etapa y la actualización en noviembre de 2010. Cabe hacer mención que las acciones 2014-2017 que conforman la última etapa del programa forman parte integral de una estrategia de salida del programa. El reconocimiento a las obras del programa cada vez es de mayor consolidación. El alcance del programa es regional, aunque su trascendencia ya empieza a ser nacional y la divulgación de la experiencia como un caso exitoso se espera, en breve, pase a ser compartida internacionalmente.

1. Prácticas y obras para la repoblación forestal y conservación de suelos.
2. Sistemas de captación de agua de lluvia en escuelas rurales.
3. Proyecto piloto de sistema de captación de agua de lluvia para riego.
4. **Acciones de eficiencia de los OOAPAS ribereños.**
5. Control de malezas acuáticas y recuperación de las especies emblemáticas.
6. Seguimiento, transferencia y rehabilitación de humedales artificiales.
7. Espacios de educación ambiental y cultura del agua.
8. Fortalecimiento a la transferencia de tecnologías apropiadas.
9. Coordinación técnica del programa para la recuperación ambiental de la cuenca del Lago de Pátzcuaro. Etapa 4.

Esta última etapa se consideró para 4 años debido a la necesidad de reforzar las bases, los conocimientos y la apropiación de los habitantes de la cuenca con sus tecnologías y sistemas instalados, de las personas capacitadas para llevar a cabo operaciones y mantenimiento de las mismas, de los niños y familias que han visto mejoría en su calidad de vida recordando que los únicos beneficiados son ellos mismos.

Como se podrá apreciar el Programa es muy extenso y son muchas las componentes que cada proyecto contempla dentro de sus objetivos y alcances, sin embargo, la información está disponible por cada uno de los 82 proyectos realizados por el IMTA y la FGRA, en estas cuatro etapas; es por ello que en este trabajo se divulgan únicamente los quehaceres y resultados del proyecto identificado en el listado anterior con el numeral **4.- Acciones de eficiencia de los OOAPAS ribereños**, el alcance del proyecto fue determinar de manera conjunta con los 4 Organismos Operadores de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento ribereños (OOAPAS), las acciones específicas para contribuir en mejorar los servicios de agua potable y drenaje, a fin de reducir la contaminación del Lago de Pátzcuaro, cuerpo de agua emblemático del estado de Michoacán.

Como resultados esperados, identificación de acciones que mitiguen la problemática en las siguientes líneas de acción: 1. Disminución de descargas de agua residuales al Lago de Pátzcuaro; 2. Protección a la comunidad por daño de inundación y evitar contaminación al Lago, reducir el volumen de azolve al Lago; 3. Acceso al servicio de agua potable a la población urbana y 4. Consolidación de los Organismos Operadores ribereños.

Es importante hacer un paréntesis aquí y mencionar que en México por mandato constitucional los Organismos Operadores de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento son las entidades encargadas de prestar los servicio Municipales de agua potable y saneamiento a la población, sin embargo, no es tarea fácil dado el constante crecimiento demográfico y la demanda de los servicios, por ello los organismos operadores se ven minimizados en infraestructura y capacidad operativa, y en algunos casos los ingresos que obtienen por la prestación del servicio solo alcanza para mantener la infraestructura hidráulica existente, más no para ampliación de la misma o ejecución de acciones preventivas y de concientización ciudadana de no contaminar los cuerpos de agua, incluidos los arroyos que actualmente se utiliza como colectores de aguas residuales hacia el lago de Pátzcuaro.

También es importante señalar que el Lago de Pátzcuaro está rodeado por los Municipios de Quiroga, Erongarícuaro, Pátzcuaro y Tzintzuntzan quienes son los responsables directos del cuidado y/o deterioro del Lago de Pátzcuaro, Michoacán, así mismo dimensionar el compromiso de los 4 OOAPAS ribereños a través del número de habitantes que atienden y de los recursos (naturales y económicos) disponibles.

Ubicación geográfica de la Cuenca del Lago de Pátzcuaro

La Cuenca del Lago de Pátzcuaro se localiza en el estado de Michoacán, México. Es una cuenca cerrada con una superficie de 929 km^2, como se muestra en la Figura 1, se desarrolla desde

los 2,035 hasta los 3,300 msnm, con una elevación promedio de 2,369 msnm. La precipitación media es de 775 mm, mientras que la evaporación es de 1,393 mm. Cuenta con un lago interior de 126.4 km^2, el cual tiene una profundidad promedio de 4.9 m y almacena 619.4 Hm^3. Su población aproximada es de 200,000 habitantes y su economía depende fundamentalmente del turismo, la explotación forestal, la pesca y las artesanías y recientemente, de las remesas que le llegan de sus migrantes que trabajan en los Estados Unidos. Por su particular belleza y sus antecedentes históricos, los cuales se remontan a épocas prehispánicas, es considerada un de las regiones emblemáticas de México.

Figura 1.-(a) Cuenca del Lago de Pátzcuaro, Michoacán; (b) Municipios y localidades ribereñas del Lago.

Población de los municipios ribereños al Lago de Pátzcuaro

Proyecciones realizadas con datos del Consejo Nacional de Población (CONAPO), para el año 2015 se estimó para Quiroga una población total de 26,633 a nivel Municipio (ver tabla 3), con un valor de hacinamiento de 4.1 (ver tabla 4), un valor estimado de viviendas de 6,495 y de ellas algunas no habitadas; para Tzintzuntzan se estimó una población total de 14,212 a nivel Municipio (ver tabla 3), con un valor de hacinamiento de 4.3 (ver tabla 4), se estimó un valor de viviendas de 3,305 y de ellas algunas no habitadas.

Tabla 2.- Población actual de los Municipios ribereños del Lago de Pátzcuaro

Municipio	Habitantes (2010)	Porcentaje	Habitantes (2016)	Porcentaje
Pátzcuaro	87,794	62.05%	92,039	62.02%
Quiroga	25,592	18.09%	26,809	18.07%
Erongarícuaro	14,555	10.29%	15,226	10.26%
Tzintzuntzan	13,556	9.58%	14,318	9.65%
	141,497	**100.00%**	**148,392**	**100.00%**

FUENTE: Censos de población y vivienda (INEGI, 2010). Año 2016 valores proyectados.

Tabla 3.- Población histórica de los Municipios ribereños del Lago de Pátzcuaro

Año	Pátzcuaro		Quiroga		Erongarícuaro		Tzintzuntzan	
	Población Total Municipio	Tasa de crecimiento en el periodo	Población Total Municipio	Tasa de crecimiento en el periodo	Población Total Municipio	Tasa de crecimiento en el periodo	Población Total Municipio	Tasa de crecimiento en el periodo
1990	66,529		21,917		11,930		11,439	
1995	75,264	2.50	23,828	1.69	13,357	2.29	12,408	1.64
2000	77,566	0.60	23,864	0.03	13,008	-0.53	11,094	-2.21
2005	79,868	0.59	23,391	-0.40	13,060	0.08	12,259	2.02
2010	87,794	1.91	25,592	1.81	14,555	2.19	13,556	2.03
2015	91,377	0.72	26,633	0.66	15,140	0.56	14,212	0.74

FUENTE: Censos de población y vivienda (INEGI, 2010). Año 2015 valores proyectados.

Cobertura de los servicios de agua potable y alcantarillado

Según el Censo de Población y Vivienda (INEGI, 2010), en Quiroga el número de viviendas habitadas fue de 6,168 a nivel Municipio, de las cuales 3,462 se encontraban en la Cabecera Municipal (ver tabla 4), es decir que el 56.1% se encuentran en la Cabecera Municipal. La estadística asociada a la cobertura del servicio de agua a nivel Cabecera y Municipio difirieron en 6

puntos porcentuales, y referente a la cobertura del servicio de alcantarillado 12 puntos porcentuales; en Tzintzuntzan el número de viviendas particulares habitadas fue de 3,173 a nivel Municipio, de las cuales 849 se encontraban en la Cabecera Municipal (ver tabla 3), es decir, el 26.8% se encuentran en la Cabecera Municipal. La estadística asociada a la cobertura del servicio de agua a nivel Cabecera y Municipio difirieron en 10 puntos porcentuales y referente a la cobertura del servicio de alcantarillado 22 puntos porcentuales. El mismo análisis se llevó a cabo para Pátzcuaro y Erongarícuaro.

Tabla 4.- Datos asociados a los servicios de vivienda (Censos de población y vivienda {INEGI, 2010})

Concepto	Pátzcuaro		Quiroga		Erongarícuaro		Tzintzuntzan		Estado
	Cabecera	Municipio	Cabecera	Municipio	Cabecera	Municipio	Cabecera	Municipio	Michoacán
Población total	55,298	87,794	14,669	25,592	2,573	14,555	3,534	13,556	4,351 037
Hacinamiento	4.18	4.28	4.20	4.12	3.81	4.22	4.16	4.28	4.02
Viviendas particulares habitadas (VPH)	13,164	20,466	3,462	6,168	674	3,448	849	3,173	1,066 630
VPH (que disponen de agua entubada en el ámbito de la vivienda)	12,495	17,953	3,356	5,631	656	3,020	771	2,561	935,651
Cobertura de agua	95%	88%	97%	91%	97%	88%	91%	81%	88%
VPH que disponen de excusado o sanitario	12,994	20,112	3,426	5,505	665	3,354	823	2,996	1,013 707
Cobertura de excusado o sanitario	99%	98%	99%	89%	99%	97%	97%	94%	95%
VPH que disponen de drenaje (alcantarillado)	12,657	16,508	3,415	5,348	619	2,176	757	2,133	944 928
Cobertura de alcantarillado	96%	81%	99%	87%	92%	63%	89%	67%	89%
VPH con energía eléctrica	13,032	20,161	3,444	6,060	668	3,396	838	3,095	1,044 515
Cobertura de energía eléctrica	99%	99%	99%	98%	99%	98%	99%	98%	98%

PROBLEMÁTICA DE LOS OOAPAS EN LA GESTIÓN DE RECURSOS

Se ha mencionado en la introducción la problemática que enfrentan los organismos operadores en general en México, los organismos ribereños del Lago de Pátzcuaro no son la excepción. En entrevistas con personal de los 4 OOAPAS ribereños se identificaron los problemas y estos se clasificaron, posteriormente se realizaron los recorridos de campo y se jerarquizaron, por tanto, se acordó que la FGRA/IMTA realizaría la elaboración de proyectos ejecutivos de rehabilitación de agua potable y drenaje, suministros de material hidráulico estratégico, así como de equipo y herramienta menor para apoyo del área de fontanería, la ejecución de acciones de rehabilitación en tanques de almacenamiento/distribución, estudios de diagnóstico de infraestructura hidráulica, topografía, geotecnia y análisis de calidad del agua, y finalmente la gestión ante las instancias Municipales, Estatales y Federales para lograr maximizar los recursos económicos y seguimiento en la ejecución de obra hidráulica identificada y plasmada en los proyectos ejecutivos.

A continuación, se enlista la problemática identificada que preocupa a los 4 OOAPAS ribereños y que indirectamente afecta las condiciones ambientales de la Cuenca del Lago de Pátzcuaro:

- Líneas de conducción que pasan por predios particulares, construcciones habitacionales y escuelas, poniendo en riesgo a la población en general y al propio personal del OOAPAS, se requiere de proyectos hidráulicos para reubicación de líneas por derecho de vía.
- Pérdida de volúmenes de agua que se fuga en 15 tanques de distribución, donde se han invertido recursos como: energía eléctrica, cloro y horas trabajo de operación del personal, además las fugas causan una mala imagen institucional para el organismo operador y el Municipio.
- Infraestructura en riesgo latente de colapso, por encontrarse situada en puntos vulnerables.
- Falta de infraestructura de red de agua potable y de drenaje para evitar focos de contaminación.

- Falta de recursos para realizar diagnóstico en 7 pozos profundos a fin de identificar las acciones necesarias para rehabilitación y uso racional de la fuente de abastecimiento.
- Rehabilitación de línea de distribución de agua potable y de drenaje por problemas continuos de fugas y por consiguiente problemas de contaminación, esto debido a que ambos servicios comparten la misma zanja en algunos tramos, y sólo una capa de tierra divide ambos servicios.
- La baja recaudación de recursos por los servicios que presta el organismo operador, lo que impide programar mantenimiento preventivo de la infraestructura y mucho menos ampliarla, al respecto se trabaja en propuestas de acción sobre los usuarios morosos.
- Baja recaudación impide realizar proyectos ejecutivos para mejorar infraestructura, ampliar coberturas de agua potable y alcantarillado (estudios y diagnósticos de infraestructura hidráulica), esto conlleva a una gestión deficiente ante las instancias que promueven los programas de mejoramiento y eficientización de infraestructura.

METODOLOGÍA

En el primer año (2014) el IMTA y la FGRA realizaron de manera conjunta con los 4 OOAPAS ribereños la identificación de 70 acciones prioritarias, inmediatamente se inició con la elaboración de 21 proyectos ejecutivos de rehabilitación y ampliación de agua potable y drenaje, rehabilitación de 3 de 15 tanques de agua potable con problemas de fuga; suministros de válvulas limitadoras de caudal (usuarios morosos) para incrementar los ingresos de los OOAPAS. En el último cuatrimestre del año se presentó el Programa ante el Gobierno del Estado de Michoacán a través de la Secretaría de Urbanismo y Medio Ambiente (SUMA) a manera de informar los alcances del Programa.

En el segundo año (2015) IMTA/FGRA/4OOAPAS se llevó el consenso de acciones prioritarias y líneas de acción, con los tres niveles de Gobierno; Comisión Nacional del Agua (CONAGUA; Gobierno Federal), Comisión Estatal de Aguas y Gestión de Cuencas (CEAC, Gobierno Estatal) y los correspondientes Municipios (Pátzcuaro, Quiroga, Erongarícuaro y Tzintzuntzan, Gobierno Municipal) entre otras instancias, a fin de maximizar y sumar recursos en el marco del Programa. De manera paralela IMTA/FGRA continuo con las acciones identificadas, suministrando válvulas limitadoras de caudal (usuarios morosos) a los 4 OOAPAS y con la atención de observaciones realizadas por la CEAC a proyectos ejecutivos anteriormente elaborados por IMTA.

En el tercer año (2016) IMTA / FGRA / 4OOAPAS / Municipios / CEAC / CONAGUA / SUMA se concretó mediante Convenio de Colaboración el pari-passsu de aportación de los 3 niveles de Gobierno a fin de ejecutar proyectos ejecutivos, elaborar nuevos proyectos, rehabilitar infraestructura y suministrode equipo y herramienta para mejorar los servicios que presta los 4 OOAPAS. La CEAC y el Municipio de Erongarícuaro aportaron el recurso económico para la ejecución de los 2 primeros proyectos de drenaje en el Municipio de Erongarícuaro. IMTA/FGRA continuo con la elaboración de proyectos ejecutivos (diagnóstico de infraestructura, topografía, geotecnia y análisis de calidad del agua), suministró de equipo y herramienta menor para fortalecer el área de fontanería y 4 diagnósticos del área comercial de los 4 OOAPAS ribereños.

En el año 2017 se acordó ejecutar la mayoría de los proyectos ejecutivos y finiquitar con el cumplimiento de los compromisos del Convenio de Colaboración, mismo que se prevé se extienda a una V etapa (2018-2021) con la participación exclusivamente del Gobierno Federal, Estatal, Municipal entre otros como a continuación se mencionan:

- El gobierno del Estado de Michoacán a través de la Secretaría de Urbanismo y Medio Ambiente (SUMA). Ahora Secretaría del Medio Ambiente, Recursos Naturales y Cambio Climático (SEMARNACC).
- La Comisión Estatal del Agua y Gestión de Cuencas del Estado de Michoacán (CEAC).
- La Comisión Nacional del Agua en Michoacán (CONAGUA).
- Los Municipios de Pátzcuaro, Quiroga, Erongarícuaro y Tzintzuntzan.
- La Comisión Nacional Forestal (CONAFOR).
- La Comisión Forestal del Estado de Michoacán (CONAFOR).
- La Comisión de Pesca del Estado de Michoacán (COMPESCA).

Tabla 5.- Resultados de las acciones de eficiencia de 4 OOAPAS ribereños (70 acciones)

PROYECTO: ACCIONES DE EFICIENCIA DE LOS OOAPAS RIBEREÑOS CLAVE DEL PROYECTO:HC-1425.4 (PRACLP) ESTATUS (DICIEMBRE 2017) DE LOS PROYECTOS DE LOS 4 OOAPAS RIBEREÑOS DE LA CUENCA DEL LAGO DE PÁTZCUARO, ETAPA IV 2014-2017				
No.	**Año**	**Localidad**	**Nombre del proyecto**	**Estatus**
1	2014	**Pátzcuaro**	Rehabilitación de Tanque elevado metálico FOVISSSTE de aprox. 60 m^3	ACCIÓN CONCLUIDA (FGRA/IMTA)
2	2014		Rehabilitación de Tanque elevado metálico INFONAVIT de aprox. 60 m^3	ACCIÓN CONCLUIDA (FGRA/IMTA)
3	2015		Rehabilitación de la Red hidráulica Calle Eréndira y anexas de la Col. Vasco de Quiroga.	ENTREGO IMTA A CEAC EN JULIO 2017
4	2015		Ampliación de Red hidráulica Calle Prolongación Benigno Serrato, Col. El Cristo.	ENTREGO IMTA A CEAC EN JULIO 2017
5	2015		Cambio del trazo de tubería hidráulica Pozo Itz-huriata a cárcamo de bombeo, 8" de diámetro.	ENTREGO IMTA A CEAC EN JULIO 2017
6	2015		Rehabilitación de atraques para reforzar la Línea de bombeo del Pozo Huecorio.	SE CAMBIO PROYECTO (2017)
7	2015		Colector de 12" de diámetro y atarjeas de la Col. San José.	EJECUTADO POR EL MUNICIPIO DE PÁTZCUARO
8	2015		Complementar tramo de tubería hidráulica de 6" de diámetro de la línea del Tanque San José hacia el Tanque los Reyes.	ENTREGO IMTA A CEAC EN JULIO 2017
9	2015		Cambio del trazo de tubería 6" de diámetro de la Calle Jacarandas en la Col. Camelinas.	ENTREGO IMTA A CEAC EN JULIO 2017
10	2016		Suministro de 2,000 válvulas antifraude (usuarios morosos)	ACCIÓN CONCLUIDA (FGRA/IMTA)/ INST. PMSAP
11	2016		Diagnóstico del área comercial de PMSAP	ACCIÓN CONCLUIDA (FGRA/IMTA)
12	2016		Limpieza y deshierbe de 3 tramos del río Guan, como de sus laderas (2.1 km)	ACCIÓN CONCLUIDA (FGRA/IMTA)
13	2017		Cambio de la línea de conducción del pozo Huecorio al tanque Redondo	ENTREGADO POR IMTA A PMSAP
14	2017		Suministro de 1,200 micro-medidores domiciliarios	ENTREGADO POR IMTA/FGRA A PMSAP
15	2017		Rehabilitación de Tanque de almacenamiento Los Reyes de aprox. 1600 m^3	CONAGUA/CEAC/MUNICIPIO PMSAP EJECUTO REC. P
16	2017		Rehabilitación de Tanque de almacenamiento El Calvario grande de aprox. 150 m^3	CONAGUA/CEAC/MUNICIPIO
17	2017		Rehabilitación de Tanque de almacenamiento Los Nogales de aprox. 50 m^3	CONAGUA/CEAC/MUNICIPIO
18	2017		Rehabilitación de Tanque de almacenamiento Linda vista de aprox. 60 m^3	CONAGUA/CEAC/MUNICIPIO
19	2017		Rehabilitación de Tanque de almacenamiento La Loma de aprox. 130 m^3	CONAGUA/CEAC/MUNICIPIO
20	2017		Rehabilitación de drenaje Plaza Vasco de Quiroga	EJECUTA MUNICIPIO DE PÁTZCUARO
21 y 22	2017		Proyecto ejecutivo de agua potable de Janitzio / Ejecución del proyecto	COMPROMISO CEAC
23 y 24	2017		Proyecto integral de saneamiento para la zona oriente (Pátzcuaro oriente, Manzanillal, Tzurumutaro y las Trojes / Ejecución del proyecto	COMPROMISO CEAC
25	2014	**Quiroga**	Suministro de 1,600 válvulas antifraude (usuarios morosos)	ACCIÓN CONCLUIDA (FGRA/IMTA) / INST. OOAPASQ
26	2015		Línea de conducción de 8"de PVC del manantial Las Palmas	ENTREGO IMTA A OOAPASQ / VALIDA CEAC
27	2015		Rehabilitación del Pozo No. 1	VALIDADO POR CEAC
28	2015		Rehabilitación del Pozo No. 2	VALIDADO POR CEAC
29	2015		Rehabilitación del Pozo No. 3	VALIDADO POR CEAC
30	2016		Suministro de 600 válvulas antifraude (usuarios morosos)	ACCIÓN CONCLUIDA (FGRA/IMTA) / INST. OOAPASQ
31	2016		Diagnóstico del área comercial del OOAPASQ	ACCIÓN CONCLUIDA (FGRA/IMTA)
32	2017		Rehabilitación del pozo #4 (IMTA/MUNICIPIO)	FGRA/IMTA_DIAGNÓSTICO (CONCLUIDO) MPIO_EQUIPAMIENTO (PENDIENTE)
33	2017		Suministro Cámara de video-inspección para tuberías de drenaje	ENTREGADO POR IMTA/FGRA A OOAPASQ
34	2017		Suministro Localizador de tuberías y cables	ENTREGADO POR IMTA/FGRA A OOAPASQ
35	2017		Suministro Cortadora de concreto/pavimento	ENTREGADO POR IMTA/FGRA A OOAPASQ
36	2017		Suministro Martillo demoledor	ENTREGADO POR IMTA/FGRA

PROYECTO: ACCIONES DE EFICIENCIA DE LOS OOAPAS RIBEREÑOS CLAVE DEL PROYECTO:HC-1425.4 (PRACLP) ESTATUS (DICIEMBRE 2017) DE LOS PROYECTOS DE LOS 4 OOAPAS RIBEREÑOS DE LA CUENCA DEL LAGO DE PÁTZCUARO, ETAPA IV 2014-2017				
No.	**Año**	**Localidad**	**Nombre del proyecto**	**Estatus**
37	2017		Rehabilitación de Tanque de almacenamiento ICATMI de aprox. 330 m^3	A OOAPASQ CONAGUA/CEAC/MUNICIPIO OOAPASQ EJECUTO REC. P
38	2017		Rehabilitación de Tanque de almacenamiento Calvario viejo de aprox. 320 m^3	CONAGUA/CEAC/MUNICIPIO
39	2017		Rehabilitación de Tanque de almacenamiento Antenas de aprox. 290 m^3	CONAGUA/CEAC/MUNICIPIO
40	2017		Rehabilitación de Tanque de almacenamiento Calvario Nuevo de aprox. 280 m^3	CONAGUA/CEAC/MUNICIPIO
41	2017		Rehabilitación de Tanque de almacenamiento Unidad Deportiva de aprox. 250 m^3	CONAGUA/CEAC/MUNICIPIO
	2017		Elaborar proyectos ejecutivos (5)	VER No. 32 LOS RESTANTES 4 CANCELO MPIO (minuta 7 Dic).
42	2014	**Tzintzuntzan**	Suministro de 1,000 válvulas antifraude (usuarios morosos)	ACCIÓN CONCLUIDA (FGRA/IMTA) / OOAPAS
43	2015		Rehabilitación del Pozo profundo del Mezquite	VALIDADO POR CEAC
44	2015		Rehabilitación de línea de distribución de agua potable de la Av. Lázaro Cárdenas.	CANCELADO MPIO
45	2015		Ampliación de línea de drenaje de la calle Aristeo Mercado.	CANCELADO MPIO
46	2015		Ampliación de la línea de distribución de agua potable y drenaje de la calle Hospital.	CANCELADO MPIO
47	2015		Rehabilitación de la línea de distribución de agua potable y drenaje de la calle Mezquite.	CANCELADO MPIO
48	2015		Rehabilitación de la línea de distribución de agua potable y drenaje de la calle Zaragoza.	CANCELADO MPIO
49	2015		Ampliación de la línea de distribución de agua potable y drenaje de la calle del Miedo.	CANCELADO MPIO {RETOMA IMTA Y TAMBIEN APOYA EN OTRA OBRA DE LA AV. LÁZARO CÁRDENAS}
50	2016		Suministro de 300 válvulas antifraude (usuarios morosos)	ACCIÓN CONCLUIDA (FGRA/IMTA) / INST. OOAPAS
51	2016		Diagnóstico del área comercial del OOAPAS	ACCIÓN CONCLUIDA (FGRA/IMTA)
52	2017		Suministro Cortadora de concreto/pavimento	ENTREGADO POR IMTA/FGRA A OOAPAS
53	2017		Suministro Martillo demoledor	ENTREGADO POR IMTA/FGRA A OOAPAS
54	2017		Suministro Compactadora (apisonador/bailarina)	ENTREGADO POR IMTA/FGRA A OOAPAS
55	2017		Rehabilitación de Tanque de almacenamiento/distribución mampostería (VITROACERO)	CONAGUA/CEAC/MUNICIPIO OOAPAS EJECUTO REC. P
56 y 57	2017		Elaboración del proyecto integral del saneamiento para las localidades del Tigre, Puerto del tigre, Sanambo, del municipio de Tzintzuntzan y Quiroga respectivamente.	CONAGUA/CEAC/MUNICIPIO (SD)
58	2014	**Erongarícuaro**	Rehabilitación de Tanque superficial de mampostería de aprox. 280 m^3	ACCIÓN CONCLUIDA (FGRA/IMTA)
59	2015		Rehabilitación del Pozo profundo el Toril	VALIDADO POR CEAC
60	2015		Rehabilitación de drenaje Km 1 Carretera Erongarícuaro-Pátzcuaro	EJECUTADO CEAC Y MUNICIPIO
61	2015		Rehabilitación de drenaje Fracc. San Antonio y Fracc. Ma. Luisa Martínez	EJECUTADO CEAC Y MUNICIPIO
62	2016		Suministro de 300 válvulas antifraude (usuarios morosos)	ACCIÓN CONCLUIDA (FGRA/IMTA) / INST. CAPAME
63	2016		Diagnóstico del área comercial del OOAPAS	ACCIÓN CONCLUIDA (FGRA/IMTA)
64	2016		Desazolve de drenaje con Camión Váctor en varios puntos críticos de la Cabecera Municipal	ACCIÓN CONCLUIDA (FGRA/IMTA)
65	2017		Rehabilitación del pozo El Llano (IMTA/MUNICIPIO)	FGRA/IMTA_DIAGNÓSTICO (CONCLUIDO) MPIO_EQUIPAMIENTO (PENDIENTE)
66	2017		Suministro Cortadora de concreto/pavimento	ENTREGADO POR IMTA/FGRA A CAPAME
67	2017		Suministro Martillo demoledor	ENTREGADO POR IMTA/FGRA A CAPAME
68	2017		Suministro Roscadora Portátil (tarraja eléctrica para tubos)	ENTREGADO POR IMTA/FGRA A CAPAME

PROYECTO: ACCIONES DE EFICIENCIA DE LOS OOAPAS RIBEREÑOS CLAVE DEL PROYECTO:HC-1425.4 (PRACLP) ESTATUS (DICIEMBRE 2017) DE LOS PROYECTOS DE LOS 4 OOAPAS RIBEREÑOS DE LA CUENCA DEL LAGO DE PÁTZCUARO, ETAPA IV 2014-2017				
No.	**Año**	**Localidad**	**Nombre del proyecto**	**Estatus**
68	2017		Suministro Compresor de 2.5 HP	ENTREGADO POR IMTA/FGRA A CAPAME
70	2017		Rehabilitación de Tanque de almacenamiento/distribución mampostería (VITROACERO)	CONAGUA/CEAC/MUNICIPIO

RESULTADOS

La Tabla 5 anterior lista 70 acciones a las cuales el IMTA/FGRA dieron seguimiento en esta cuarta etapa (2014-2017), muchas de ellas atendiendo a una problemática puntual identificada y con la finalidad de mejorar la eficiencia física y comercial de los 4 OOAPAS ribereños, con ello contribuir en mejorar los servicios de agua potable, drenaje y saneamiento que se ofrecen a los usuarios de los Municipios ribereños y sobre todo hacer públicos los resultados a la propia población para hacer conciencia del deterioro de la Cuenca del Lago de Pátzcuaro y la importancia del cuidado de los recursos naturales con que se dispone (ver Figura 2).

Los resultados se tienen documentados por año, así en los dos primeros años (2014-2015) IMTA/FGRA identificó de manera conjunta con cada uno de los OOAPAS ribereños la problemática a atender referente a los servicios de agua potable, alcantarillado y saneamiento, mismos que se jerarquizaron y se atendieron (ejecución de acciones, suministro de material hidráulico estratégico y elaboración de proyectos ejecutivos, ver tabla 1 proyectos correspondientes al 2014 y 2015).En los dos siguientes años (2016-2017) IMTA/FGRA involucraron la participación de los 3 niveles de Gobierno y otras instancias al Programa con participación activa de los mismos, el instrumento legal un Convenio de Colaboración al Programa para la Recuperación Ambiental de la Cuenca del Lago de Pátzcuaro.

Figura 2.-Divulgación de los trabajos realizados en la Cuenca.

CONCLUSIONES

El objetivo del presente trabajo se alcanzó con creces, y queda demostrado nuevamente que el trabajo colectivo (IMTA/FGRA/SEMARNACC/CONAGUA/CEAC/Municipios/) divide las tareas y multiplica el éxito, en el mediano plazo (2015-2017) se concretarán la mayoría de los proyectos ejecutivos en obra (pari-passu, entre los tres niveles de gobierno), a la conclusión de esta etapa se cuenta con el equipo y herramienta de apoyo para facilitar las tareas de mantenimiento de infraestructura hidráulica, se tiene identificado y presupuestado la cartera de acciones para impulsar la eficiencia comercial como resultado del diagnóstico del área comercial en los 4 OOAPAS, todo ello con el objetivo de llevar a la sustentabilidad a los 4 organismos ribereños a fin de recuperar el emblemático Lago de Pátzcuaro, Michoacán, restableciendo el equilibrio entre ambiente y sociedad.

El alcance del Programa para la Recuperación Ambiental de la Cuenca del Lago de Pátzcuaro es regional, aunque su trascendencia ya empieza a ser nacional y la divulgación de la experiencia como un caso exitoso se espera, en breve, pase a ser compartida internacionalmente.

Agradecimientos:La Fundación Gonzalo Río Arronte (FGRA) y el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) quienes a través del "Programa para la Recuperación Ambiental de la Cuenca del Lago de Pátzcuaro" en sus cuatro etapas (2003-2018) acuerdan financiar y realizar el proyecto en beneficio de los 4 OOAPAS ribereños del Lago de Pátzcuaro. Así mismo a los organismos operadores ribereños de Pátzcuaro, Quiroga, Erongarícuaro y Tzintzuntzan por su interés en las acciones y proyectos en común acuerdo para beneficio de la población y del cuidado del emblemático Lago de Pátzcuaro, Michoacán, México.

REFERENCIAS

Antúnez, L. E., Casados, P. J. A.; Hansen, R. M. P.; Gómez L. L. (2016-2017). "Acciones de eficiencia de los OOAPAS ribereños". Programa para la Recuperación Ambiental de la Cuenca del Lago de Pátzcuaro (etapa IV 2014-2017). Informe final 2017. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), Morelos, México.

Antúnez, L. E., Blanco, O. A. (2016). "Acciones de eficiencia de los organismos operadores de agua, ribereños del Lago de Pátzcuaro, Michoacán, México". *XXVII Congreso Latinoamericano de Hidráulica*, Lima, Perú.

Antúnez, L.E. (2014-2015). "Acciones de eficiencia de los OOAPAS ribereños". Programa para la Recuperación Ambiental de la Cuenca del Lago de Pátzcuaro (etapa IV 2014-2017). Informe de avance parcial 2015. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), Morelos, México.

Antúnez, L.E. (2015). "Evaluación de la infraestructura electromecánica y video-inspección en 5 pozos profundos. Resultado: Acciones de rehabilitación presupuestadas". *XIV Seminario Iberoamericano de agua y drenaje; SEREA*, Guanajuato, Gto., México.

Antúnez, L.E. (2015). "Evaluación de la infraestructura electromecánica y video-inspección en 5 pozos profundos. Resultado: Acciones de rehabilitación presupuestadas". *Los servicios de agua y drenaje con una visión integral*, ISBN: 978-607-441-366-3; septiembre 2015, Sección 5, capítulo 8; pág. 516-530.

Antúnez L. E.; Hansen R. M. P., Alcocer Y. V. H. (2012). "Sustentabilidad de los OOAPAS ribereños". Implementación del Distrito Hidrométrico Antenas II, Quiroga, Michoacán México. Programa para la Recuperación Ambiental de la Cuenca del Lago de Pátzcuaro (etapa III 2010-2012). Informe final técnico IMTA, Morelos, México.

Antúnez L. E., Hansen R. M. P.; Bourguett O. V. J. (2009). "Sustentabilidad de los OOAPAS ribereños". Implementación del Distrito Hidrométrico Calvario Sur, Quiroga, Michoacán México. Programa para la Recuperación Ambiental de la Cuenca del Lago de Pátzcuaro (etapa III 2010-2012). Informe final técnico IMTA, Morelos, México.

Antúnez L. E., Maldonado S. J., Caldiño. V. I., Cortez M. P. E., Hansen R. M. P. (2007). "Mejora de la eficiencia física y comercial en el Organismo Operador de Quiroga (segunda etapa)". Programa para la Recuperación Ambiental de la Cuenca del Lago de Pátzcuaro (segunda etapa- segunda fase 2006-2007). Informe final técnico IMTA, Morelos, México.

Antúnez L. E., Maldonado S. J., Hansen R. M. P. (2005). "Estudios de detección y reparación de fugas para incrementar la eficiencia física de cuatro Organismos Operadores de Agua Potable y Alcantarillado Sanitario (OOAPAS), ribereños del Lago de Pátzcuaro, Quiroga Michoacán". Programa para la Recuperación Ambiental de la Cuenca del Lago de Pátzcuaro (segunda etapa- primera fase 2004-2005). Informe final técnico IMTA, Morelos, México.

Hansen R. M. P., Ochoa A. L., Maldonado S. J., Martín D. A., Antúnez L. E. (2005). "Plan de acción para el Mejoramiento de los Servicios de Agua Potable y Saneamiento, Quiroga Michoacán". Programa para la Recuperación Ambiental de la Cuenca del Lago de Pátzcuaro (segunda etapa- primera fase 2004-2005). Informe final técnico IMTA, Morelos, México

Muñoz M. A., Camino Z. A. (2004). "Plan Estratégico de Acciones para la Recuperación del Lago de Pátzcuaro: Recurso Agua". Programa para la Recuperación Ambiental de la Cuenca del Lago de Pátzcuaro (primera etapa 2003-2004). Informe final técnico IMTA, Morelos, México.

IAHR **AIIH**
XXVIII CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA
BUENOS AIRES, ARGENTINA, SEPTIEMBREDE 2018

ENSEÑANZA EN AFOROS CON INSTRUMENTOS ULTRASÓNICOS

***Mauricio de Jesús Escalante Estrada*[1], *J. Jesús Gómez Lázaro*[2],**
***José Alfredo González Verdugo*[1]**
[1]Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Paseo Cuauhnáhuac No. 8532, Col. Progreso Jiutepec, Morelos, México
E-mail: mescalan@tlaloc.imta.mx, jagonzal@tlaloc.imta.mx
[2]Posgrado en Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, México
E-mail: jesgolaz@comunidad.unam.mx

RESUMEN:

Desde 2003 dentro de los programas de mejoramiento de la medición de la CONAGUA y CFE, el IMTA ha participado en la elaboración de especificaciones técnicas, procedimientos de medición y protocolos de mantenimiento de sistemas de medición con tecnología de punta y alto grado de precisión (error < 2%). Los resultados de estos programas se han reflejado en la instrumentación de presas de almacenamiento y puntos de control en canales de los Distritos de Riego, de la CONAGUA y en las principales Centrales Hidroeléctricas de la CFE.

Para multiplicar la capacitación del personal técnico de la CONAGUA y CFE, así como de empresas que contemplen la especialización en la instrumentación con equipos de medición ultrasónica (tecnología de tiempo de travesía y de efecto doppler), se han llevado cursos presenciales del tipo teórico práctico.

El presente trabajo muestra el contenido de los cursos y la experiencia obtenida en ellos que ha provocado una mejora en el uso operación y mantenimiento de los aforadores automáticos.

Durante el desarrollo de los cursos de Hidrometría Ultrasónica se presentaron los fundamentos de la medición de caudal en tuberías y canales, las recomendaciones para una buena operación de aforadores automáticos, el efecto doppler y su utilización en aforo de flujos a superficie libre, la metodología de calibración de aforadores, e instrumentos portátiles, la técnica de tiempo de travesía, y por último aforadores de garganta larga.

Las dinámicas de los cursos consisten en ir presentando la teoría de las técnicas, realizar ejercicios numéricos resueltos en el aula de situaciones frecuentes y en práctica de aforo ya sea en el laboratorio Enzo Levi del IMTA o bien en un canal de riego de la CONAGUA. También en el aula se presentaron los programas de cómputo para el manejo de los dispositivos electrónicos que configuran o parametrizan los equipos ultrasónicos.

PALABRAS CLAVES: enseñanza, aforo, ultrasonido

INTRODUCCIÓN

Desde el año 2003 dentro de los programas de mejoramiento de la medición de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) y Comisión Federal de Electricidad (CFE), el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) ha participado en la elaboración de especificaciones técnicas, procedimientos de medición y protocolos de mantenimiento de sistemas de medición con tecnología de punta y alto grado de precisión (error < 2%). Los resultados de estos programas se han reflejado en la instrumentación de 42 presas de almacenamiento y 274 puntos de control en canales de los Distritos de Riego, de la CONAGUA y en las 38 principales Centrales Hidroeléctricas de la CFE.

Para multiplicar la capacitación del personal técnico de la CONAGUA y CFE, así como de empresas que contemplen la especialización en la instrumentación con equipos de medición ultrasónica (tecnología de tiempo de travesía y de efecto Doppler), se han impartido cursos presenciales del tipo teórico-práctico.

El presente trabajo muestra el contenido de los cursos y la experiencia obtenida en ellos, lo que ha que ha provocado una mejora en la operación y mantenimiento de los aforadores automáticos.

Durante el desarrollo de los cursos se presentan los fundamentos de la medición de caudal en tuberías y canales, las recomendaciones para una buena operación de aforadores automáticos, el efecto Doppler y su utilización en aforo de flujos a superficie libre, la metodología de calibración de aforadores, e instrumentos portátiles, la técnica de tiempo de travesía, y por último aforadores de garganta larga.

Las dinámicas de los cursos consisten en ir presentando la teoría de las técnicas en el aula realizando ejercicios numéricos resueltos de situaciones frecuentes. Se llevan a cabo prácticas de aforo ya sea en el laboratorio Enzo Levi del IMTA o bien en algún canal de riego ~~de~~ perteneciente a la CONAGUA. También en el aula se presentan los programas de cómputo para el manejo de los dispositivos electrónicos que configuran o parametrizan los equipos ultrasónicos.

En términos generales se considera que los cursos cubren cabalmente las expectativas de los asistentes, motivando a los mismos a seguir obteniendo información sobre el tema para afianzar el aprendizaje adquirido. En los capítulos se mencionan a manera de resumen,los temas de los contenidos de los cursos.

FUNDAMENTOS DE HIDRÁULICA

Durante el desarrollo de los cursos se presentan los fundamentos de la medición de caudal en tuberías y canales. En esta parte los participantes conocen la distribución de velocidades, cómo calcular el área hidráulica, la velocidad media, el gasto o caudal, el volumen totalizado, tipos de errores de medición, precisión absoluta y relativa, métodos directos e indirectos de medición de gasto, y los métodos usuales de medición.

SELECCIÓN DE TÉCNICA DE AFORO E INCERTIDUMBRE

En esta parte del curso se presenta los métodos y técnica de aforo. El método son los principios físicos para determinar el gasto como son “área-velocidad”, o “tirante-gasto”. La técnica se basa en la aplicación del método con la herramienta disponible. En cada medición es necesario conocer el error posible, y si éste es aleatorio o sistemático, su manera de determinar y posible corrección.

Se recomienda que el punto de medición esté en un tramo largo mayor a diez veces el ancho del espejo de agua en un canal o río o diez veces el diámetro si se trata de medidor en tubería.

RECOMENDACIONES PARA UNA BUENA OPERACIÓN

En este segmento del curso el participante conoce los aforadores automáticos fijos, las partes que los integran y los cuidados básicos que se deben tener en cuenta para la correcta operación de los mismos, como son el cuidado de la energía que se suministra al equipo de medición desde las celdas solares, baterías, y controlador de carga. También se hace hincapié en la limpieza de la sección de aforo y vaso comunicante entre canal y caseta para que el área hidráulica determinada sea la correcta. Por último, en este segmento se recomienda la necesidad de las adecuadas reglas o escalas donde se observa el nivel del canal.

Figura 1. Terminal de batería en mal estado, y pintado de escala

AFORADOR DOPPLER LATERAL (ADL)

En el curso se muestra sus principios de funcionamiento, sus alcances, que zonas puede medir, que zonas no puede medir. También criterios de instalación, necesidad de determinar una buena sección transversal para tener una buena área hidráulica. Se indican las partes que integran un sistema de aforo con esta tecnología.

También se presenta la manera de configurar la sección hidráulica, esquema de muestreo para obtener velocidades de los equipos de las marcas instaladas ya en medidores de la CONAGUA, como son Sontek (2010) y RDI Teledyne (2005).

En la figura 2 se muestra que un aforador doppler no puede medir en una zona cercana a él y que los bordes como son el piso o la cara del canal frente a él se llaman “zonas de blanqueo” donde los resultados de medición de velocidades son malos que es preferible no tomar en cuenta.

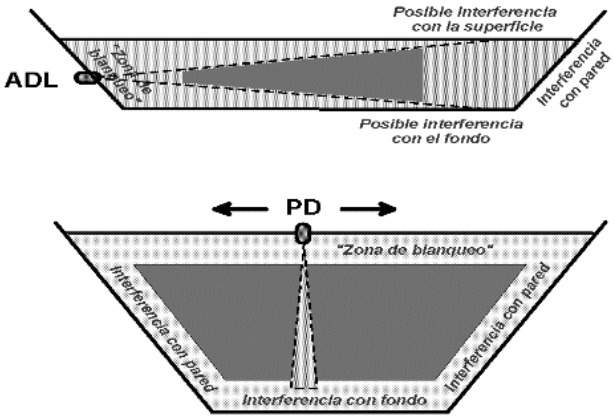


Figura 2. Zonas posibles de medición de un aforador doppler

METODOLOGÍA DE CALIBRACIÓN DE UN PERFILADOR ACÚSTICO FIJO

En el curso se describe paso a paso la manera de calibrar un equipo Doppler lateral o de fondo. El método sigue siendo "área-velocidad", pero ahora se usa la teoría de la velocidad índice, que consiste en ajustar la medición de una parte del canal (en este caso el perfil de velocidades en la horizontal) con la velocidad media de toda la sección transversal, dado que no es posible a priori que el plano de medición está observando velocidades rápidas o lentas respecto a la velocidad media, es necesario calibrar la velocidad índice para que represente la velocidad media.

Se eligen las secciones de aforo, una donde se sitúa el medidor Doppler lateral y otra donde es posible aforar como referencia. En ambas secciones se hace un levantamiento topográfico a fin de determinar el área hidráulica. El aforo de referencia se lleva a cabo con una técnica de aforo de poco error. Ahora hay herramientas que pueden tomar más de 20 segmentos y muchas más lecturas de velocidad, como son los perfiladores Doppler portátiles como el SontekHydrosurveyor M9/S5, que en este mismo curso se imparte.

Una vez obtenidos los caudales del aforador doppler lateral (ADL) y el de referencia, se comparan las velocidades medias; la del ADL es la velocidad índice, y la del perfilador que es la referencia. Se solicita hacer este procedimiento para seis gastos (tirantes) que cubran desde un gasto mínimo hasta el máximo, y sobre todo aquel gasto que sucede la mayor parte del tiempo. Utilizando regresión lineal se hace un gráfico de dispersión donde se determina la recta que mejor ajusta. Dicha ecuación se introduce en el software del equipo correspondiente con lo que se puede decir que el equipo quedó calibrado.

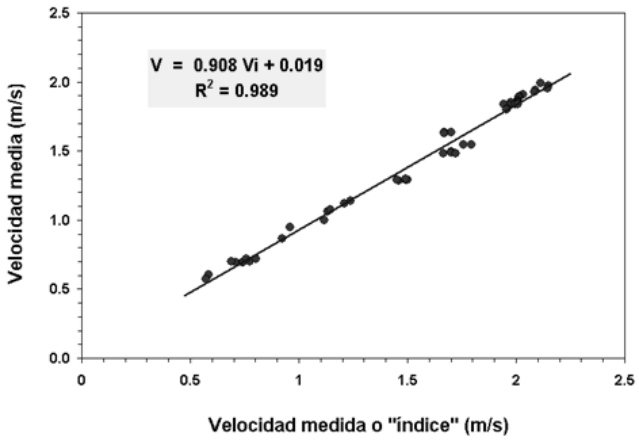


Figura 3. Correlación velocidad media contra velocidad índice

OPERACIÓN DEL PERFILADOR ACÚSTICO M9/S5

En este subtema, se presentan las partes que integran el medidor M9/S5, los datos que se requieren como profundidad del sensor una vez sumergido, declinación magnética, entre otros. Se presentan algunas actividades que llevan a buen éxito de aforo como la calibración adecuada de la brújula interior del equipo, el movimiento del equipo durante el aforo, el cierre del aforo para obtener gasto, así como la descarga de datos. Es necesario mencionar que es una herramienta que se usa de referencia debido al gran número de celdas de medición que realiza, tanto a lo largo de la sección transversal, como en la profundidad. El perfilador es montado en un flotador comúnmente le denominamos "barquito", y por medio de cuerda se hace pasar varias veces en la sección transversal del canal.

Se descargan los datos y se procede a su análisis. En la figura 4 se muestra la pantalla del software *Hydrosurveyorlive*, que es específico para el manejo de los mismos. Se aprecia la sección transversal recabada, el recorrido del aforo, y por último las velocidades medidas. Con ello es posible configurar el fondo de un canal donde se requiere calibrar un ADL.

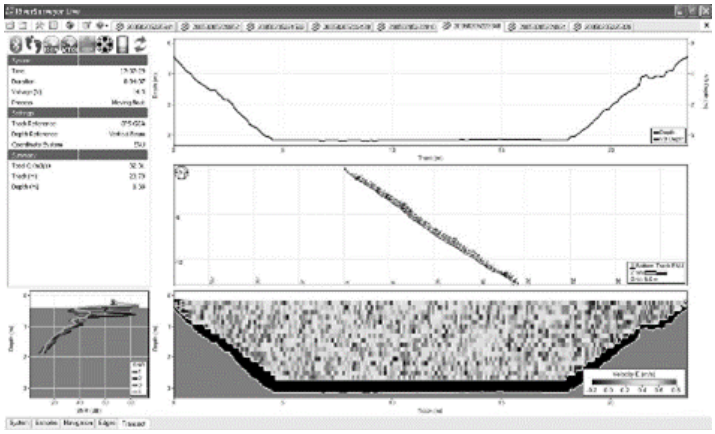


Figura 4. Sección transversal y velocidades.

PRÁCTICAS DE CAMPO

Los cursos se llevan a cabo en un aula donde se presentan los temas en diapositivas, los participantes hacen cálculos numéricos de áreas, velocidades, medias, desviaciones estándares, y conocen con imágenes los equipos.En los cursos también se hacen prácticas de aforo como se ve en la figura 5, donde se enseña a los asistentes a operar un perfilador acústico M9/S5 (barquito).

También se han llevado equipos al aula, donde se ensaya la conexión eléctrica de los mismos, con el fin que los asistentes puedan aprender a conectarlos y operarlos, como se muestra en la figura 6.

Figura 5. Práctica de aforo con M9/S5

Figura 6. Asistentes al curso probando energía en equipos.

CONCLUSIONES

Durante el desarrollo de los cursos los asistentes participaron exponiendo sus necesidades y experiencias en cuestión de aforos, enriqueciendo los contenidos del mismo. Han reconocido que el dato de caudal en un aforo no es dato único, sino que es un dato que está en una cantidad media que varía entre más menos un porcentaje en función de la técnica adecuada.

Aprendieron a identificar los requerimientos que se deben tener para un correcto aforo, y que no sólo el aforo con molinete mecánico es la única manera de cuantificar el agua, sino que existen más técnicas y herramientas que aumentan la calidad de los resultados, y hasta simplificar el trabajo físico.

En términos generales se considera que los cursos cubren cabalmente las expectativas de los asistentes, motivando a los mismos a seguir obteniendo información sobre el tema para afianzar el aprendizaje adquirido.

REFERENCIAS

Escalante Estrada, M; Reza Arzate, G (2015). Hidrometría ultrasónica Apuntes de curso. Jiutepec, Mor. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

SonTek/YSI (2010), RiverSurveyor S5/M9. System Manual. USA http://www.sontek.com

Tamari Wagner, S; Aguilar Chávez, A (2010). Aforo en canales y presas: selección de una técnica. Jiutepec, Mor. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. (Colección Guías Técnicas) 40 p.

RDI Teledyne (2005). Channel Master Operation Manual, USA. http://www.teledynemarine.com/rdi/

CENTRO MEXICANO DE INNOVACIÓN EN ENERGÍA DEL OCÉANO: CEMIE-OCÉANO

Posada Vanegas Gregorio [1], Silva Casarín Rodolfo [2], Félix Delgado Angélica [3], Mendoza Baldwin Edgar [2], Enríquez Ortiz Cecilia [4], Mariño Tapia Ismael [5], Ocampo Torres Francisco [6], Alatorre Mendieta Miguel Angel [7]

[1] Instituto EPOMEX, Universidad Autónoma de Campeche, Av. Héroe de Nacozari No 480, San Francisco de Campeche, Camp, México
[2] Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria CP 04510, Ciudad de México, México
[3] Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Cátedras CONACyT, CU, CP 04510, Ciudad de México, México
[4] Facultad de Ciencias, Unidad Académica Sisal, Universidad Nacional Autónoma de México, C.P 97356, Sisal, Yucatán
[5] CINVESTAV-Unidad Mérida, C.P 97310, Mérida, Yucatán
6 CICESE, Carretera Ensenada Tijuana 3918, C.P 22860, Ensenada, Baja California
7 Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, Universidad Nacional Autónoma de México, CU, CP 04510, Ciudad de México, México
gposadav@uacam.mx, rsilvac@iingen.unam.mx, afelixd@iingen.unam.mx, emendozab@iingen.unam.mx , cenriqz@ciencias.unam.mx , imarino@mda.cinvestav.mx , ocampo@cicese.mx , energiaoceano@gmail.com

RESUMEN:

El presente artículo aborda la conformación del Centro Mexicano de Innovación en energía del Océano, así como las actividades y resultados principales que han sido obtenidos, por las 42 instituciones y casi 500 personas que conforman el CEMIE-Océano durante las tres primeras ministraciones semestrales, enero 2017-julio 2018.

ABSTRACT:

This article describes the conformation of the Mexican Center for Innovation in Ocean Energy, as well as the main activities and results that have been obtained by the 42 institutions and nearly 500 people that make up the CEMIE-Ocean during the first three biannual administrations, January 2017-July 2018.

This document serves as a sample for a full paper using Microsoft Word 2007 to help you format

PALABRAS CLAVES: Energía Renovables, Océano, México

INTRODUCCIÓN

El proyecto Centro Mexicano de Innovación en Energía del Océano, CEMIE-Océano, inició labores en enero de 2017, aún así su concepción, diseño y puesta en marcha se remonta a diciembre de 2014 cuando, por medio del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, comenzó el esfuerzo para conjuntar el trabajo de 42 instituciones que son concientes que para el desarrollo de México, a mediano y largo plazo, es necesario e imperativo: 1) desarrollar tecnología que permita utilizar eficientemente las fuentes de energía asociada al Océano, tal como pueden ser las relacionadas con el oleaje, corrientes, gradiente térmico y salino, 2) desarrollar de nuevos materiales y formas de almacenar y vincular los dispositivos generadores a la red eléctrica nacional; 3) formar recursos humanos, generación de empresas y difusión de conocimientos adquiridos a la sociedad.

La visión del CEMIE-Océano es el convertirse en un núcleo multidisciplinario proveedor de investigación aplicada, desarrollo tecnológico e innovación, dirigidos a la extracción de las diversas formas de energía del océano, su conversión y distribución, por medio de la unión de las capacidades de la academia, industria y gobierno federal. Su misión se centra en generar productos innovadores, técnicas y tecnologías que exploten la diversidad de recursos energéticos oceánicos disponibles para suministrar sustentable, efectiva y rentablemente una parte cada vez mayor de la demanda energética de la República Mexicana.

Los objetivos del centro son los siguientes: Extender y mejorar las capacidades de investigación y desarrollo de tecnología de modo colaborativo, b) Fomentar la formación y especialización de recursos humanos, c) Vincular el ámbito académico con el industrial, d) Desarrollar una cartera de proyectos específicos asociados a la obtención de energía del mar.

Al día de hoy, el primer año y medio de actividades, ha estado enfocado a la evaluación de los recursos energéticos en México, valoración, de las tecnologías existentes, integración de los grupos de trabajo, compra de equipos científicos necesarios para el cumplimiento de las actividades propuestas por cada una de las instituciones, desarrollo de campañas de campo, análisis de datos de equipos propios de las instituciones participantes que comenzaron a recabar datos desde 2015, puesta a punto de la normatividad interna del proyecto CEMIE-Océano y difusión de resultados, reuniones y actividades por medio de la página www.cemieoceano.mx y redes sociales.

Las oportunidades de desarrollo del proyecto son positivas ya que el grupo de trabajo está en proceso de consolidación y crecimiento ya que la cantidad de instituciones que desean, en etapas futuras, ingresar al CEMIE-Océano es alta, igualmente, al contar con la mayoría de los equipos, la generación de datos oceanográficos y costeros se incrementará sustancialmente lo que permitirá tener información real para validar, física y numéricamente, los prototipos que previamente las instituciones han desarrollado.

CONFORMACIÓN CEMIE-OCÉANO

El proyecto CEMIE Océano está liderado por la Universidad Nacional Autónoma de México en cabeza del Instituto de Ingeniería, hacen parte de él 42 instituciones de los estados de Baja California, Baja California Sur, Campeche, Ciudad de México, Coahuila, Colima, Guanajuato, Jalisco, Michoacán, Morelos, Puebla, Querétaro, Quintana Roo, Sinaloa, Tamaulipas Veracruz, Yucatán y Zacatecas, cuenta con la participación de 480 personas entre estudiantes, investigadores y personal administrativo.

En la figura 1 se indica la estructura de su cuerpo directivo, el cual, además de estar conformado por instituciones de investigación, tiene como invitados permanentes a la Secretaria de

Energía y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de México, así como las empresas dedicadas a la innovación y obtención de energía del océano, Axis, Dina y Potencia Industrial

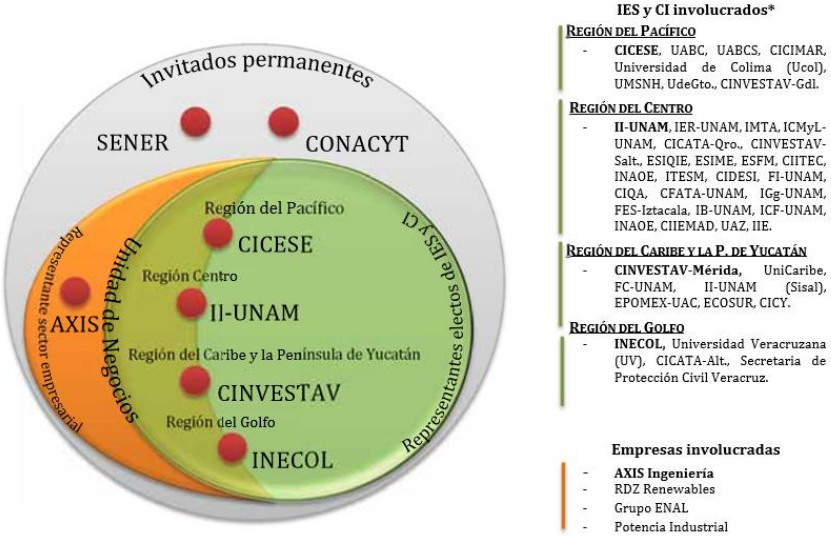


Figura 1.- Grupo Directivo CEMIE-Océano

El CEMIE-Océano está compuesto por 2 tipos de líneas de trabajo: estratégicas y transversales, las primeras se encargan de realizar los estudios, diseño de prototipos, caracterizaciones del recurso energético relacionados con los procesos físicos de gradiente salino, gradiente térmico, corrientes y oleaje; las líneas transversales (ecología, subsistemas y materiales, almacenamiento y transmisión, difusión y divulgación, simulación física y numérica, formación de recursos humanos, gestión de infraestructura y unidad de negocios) interactúan, en diferentes escalas, con las líneas estratégicas, para prestar servicios a todos los participantes del CEMIE, de tal manera que el trabajo sea colaborativo y longitudinal, en la figura 2.

RESULTADOS

El proyecto CEMIE-Océano tiene una duración inicial de 4 años (2017-2021), los principales resultados, por línea, obtenidos durante el primer año y medio de funcionamiento son:

• Línea de Oleaje: identificar las costas mexicanas con mayor potencial energético, caracterizando su distribución espectral, utilizando tanto simulaciones numéricas como observaciones para diseñar e implementar dispositivos adecuados de generación de energía. Figura 3.

• Línea de Corrientes y Mareas: Caracterizar el potencial de generación de energía mareomotriz e hidro-cinética basada en condiciones actuales que cubra la duración del ciclo de vida del proyecto, en zonas de alto potencial del Golfo de California; actualmente esta línea presenta avances numéricos en las pruebas de dispositivos para obtención de energía por corrientes y generó un inventario nacional de corrientes marinas, mareas y procesos asociados (dinámica sedimentaria) y su variabilidad bajo distintas condiciones ambientales para México. Figura 4.

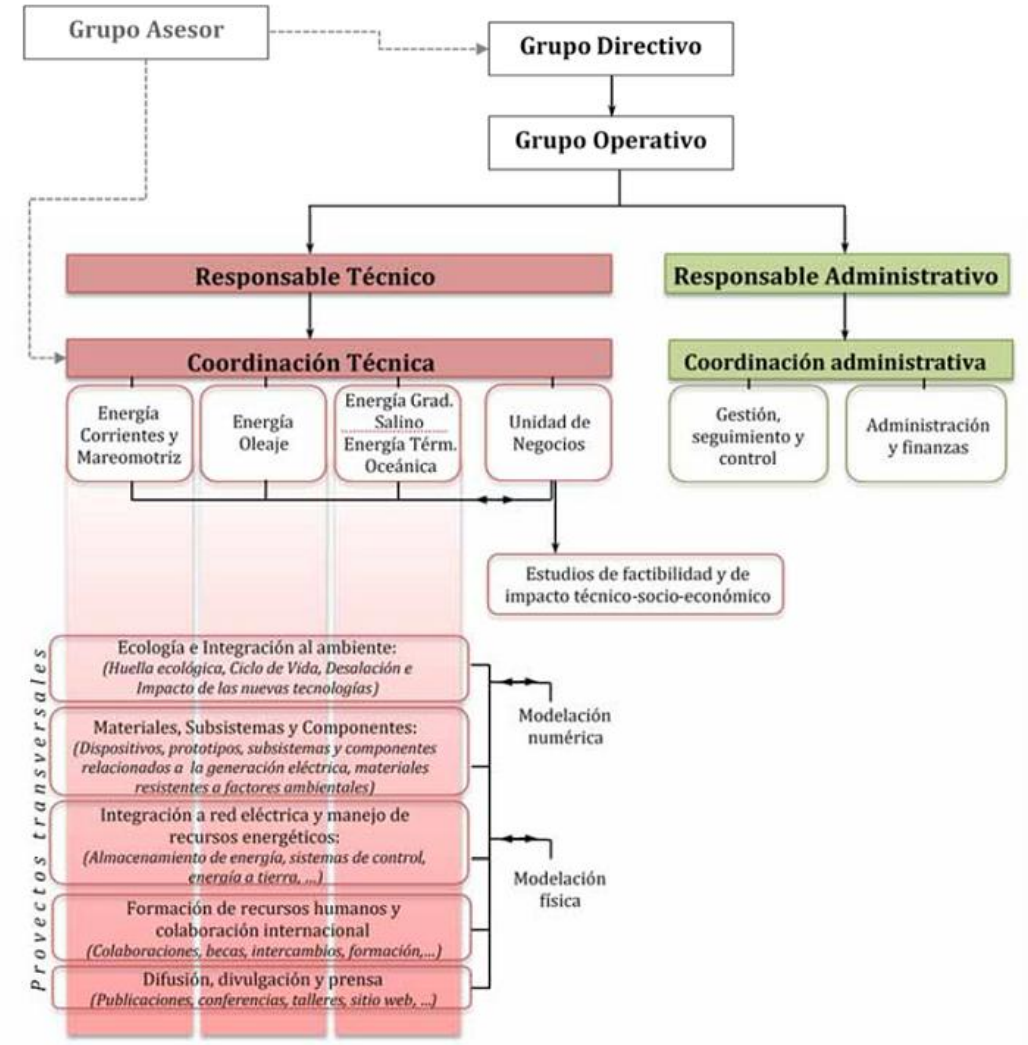


Figura 2.- Líneas de trabajo del CEMIE-Océano

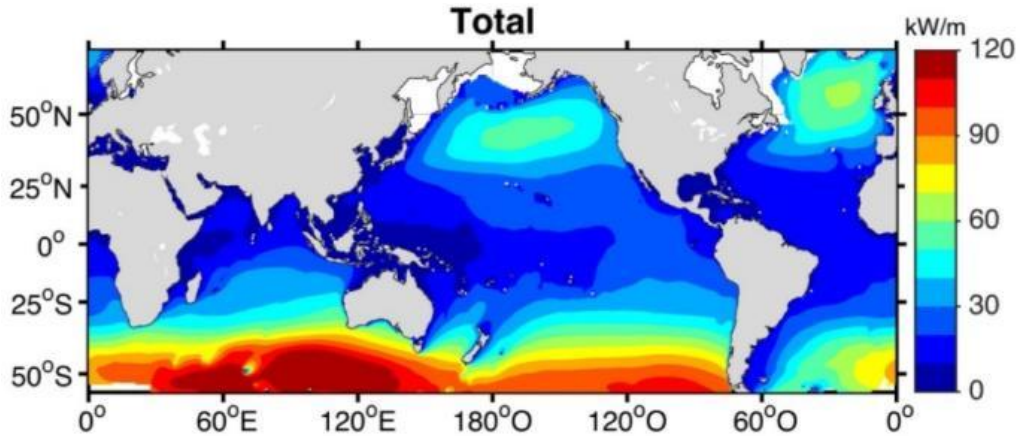


Figura 3. Potencia asociada a oleaje, obtenida por medio del modelo global WWIII, CICESE

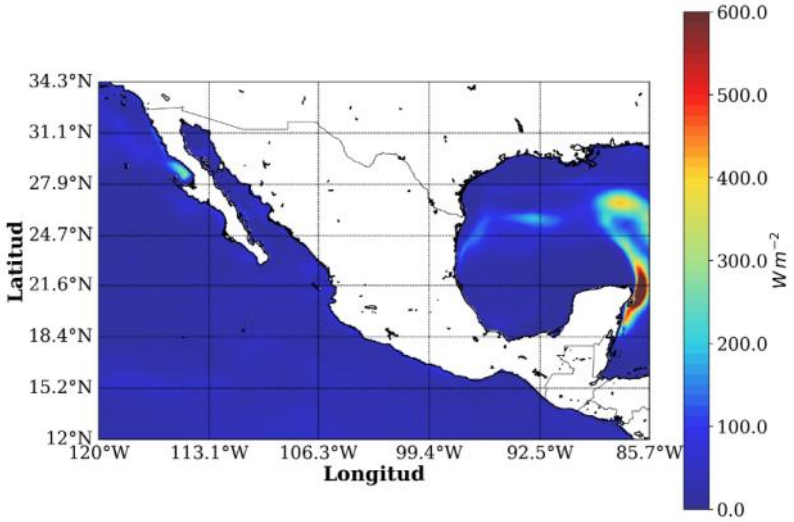


Figura 4. Potencial energético asociado a corrientes, CINVESTAV, Mérida

• Línea de Gradiente Térmico: capturar la información en una base de datos que proporcione las características térmicas de los sitios estudiados e integrarla con las demás variables en el proyecto del Atlas que cumpla con los lineamientos de proyectos afines; está línea ha identificado los lugares de aprovechamiento de gradientes de temperatura con potencial energético de explotación en México, los cuales se ubican en el Pacífico y Mar Caribe, Figura 5.

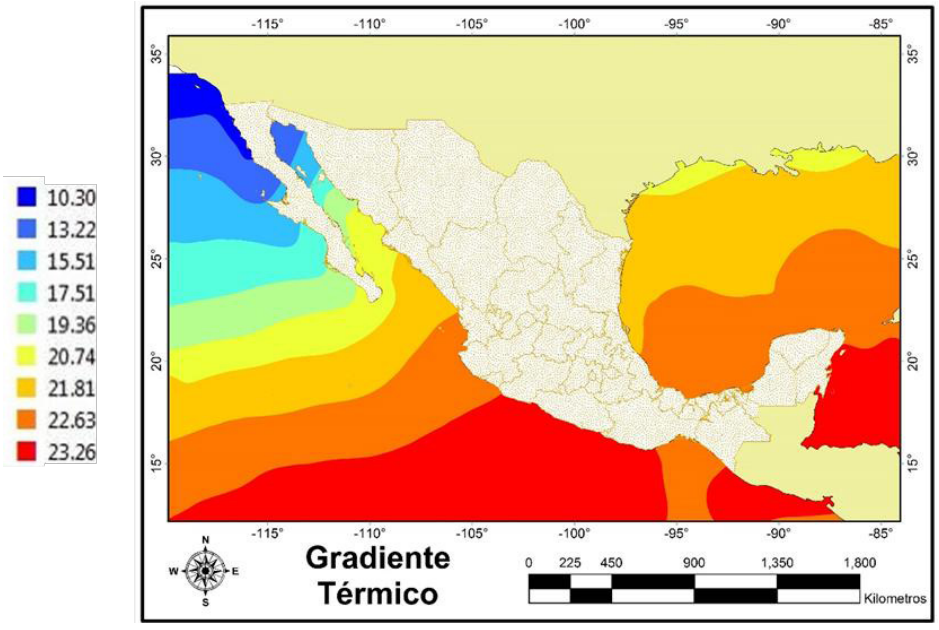


Figura 5. Gradiente Térmico, Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM

• Línea de Gradiente Salino: capturar la información en una base de datos que proporcione las características termohalinas de los sitios estudiados (laguna costera, desembocadura, laguna hiperhalina) e integrarla con las demás variables en el proyecto del Atlas CEMIE-Océano. Esta línea ya ha realizado 3 campañas de campo en los sitios anteriormente descritos (Estados de Oaxaca, Veracruz, Campeche y Yucatán, asi como en el departamento de Antioquia, Colombia). Figura 6.

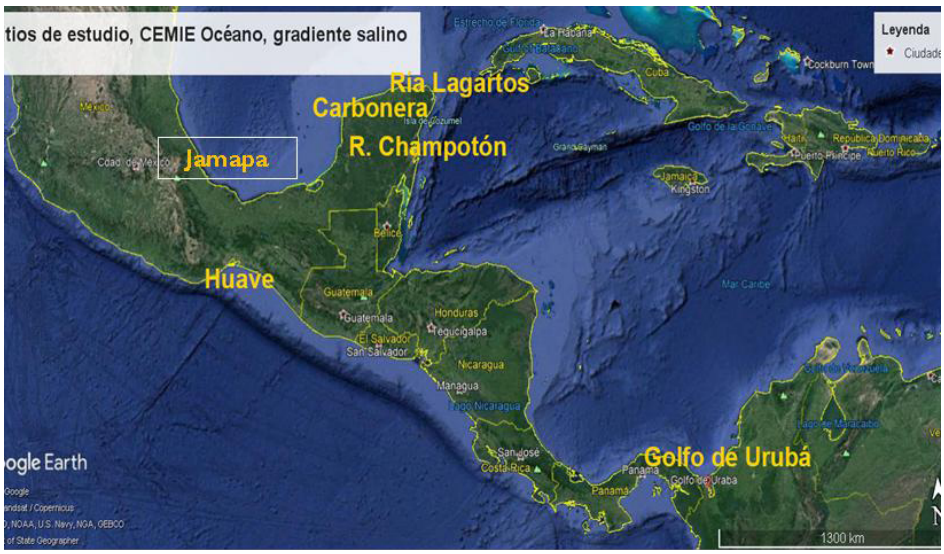


Figura 6. Sitios de muestreo línea de gradiente salino

• Línea Unidad de Negocios: apoyo al CEMIE – Océano con servicios especializados en temas de transferencia tecnológica y de Propiedad Intelectual; Realizar el estudio de alternativas de la conformación jurídica del CEMIE-Océano, a marzo de 2018 esta línea ha apoyado a los procesos de vinculación, protección y transferencia en los departamentos de I+D+I en las universidades, centros de investigación o empresas.

• Línea Gestión de Infraestructura: integrar la base de datos (inventario) del equipo a disposición (adquirido con recursos del CEMIE-Océano y del existente en las Instituciones participantes) de los Grupos Estratégicos y de Operación Temática del CEMIE-Océano. Actualmente esta línea ha comprado el 90% de los equipos científicos que utilizará el proyecto.

• Línea de Integración a la Red Eléctrica y Manejo de Recursos Energéticos: dentro de los resultados obtenidos por esta línea se destacan: a) Estudios del estado del arte: gradiente térmico, gradiente salino, sistemas de almacenamiento de energía, generadores olas, corrientes, inversores y aerogeneradores off-shore, b) Establecimiento de sistemas de monitoreo en conjunto con las líneas pilares, c) Desarrollo de modelos de operación real para generadores marinos: OTEC, gradiente salino (RED y PRO).

• Línea de Materiales, subsistemas y componentes: innovación de nuevos recubrimientos cerámicos y/o poliméricos capaces de brindar protección anticorrosiva a componentes y subsistemas; Desarrollo de componentes y subsistemas inherentemente resistentes a daños mecánicos y corrosivos en ambientes marinos, Desarrollo de materiales compuestos que puede reducir la corrosión por arriba del 99% incluso para acero al carbón (acero altamente susceptible a la corrosión).

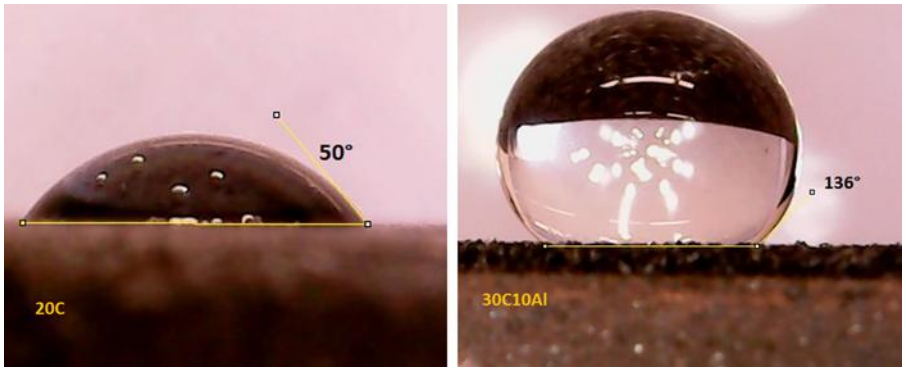


Figura 7. Generación de superficies hidrófobas para disminuir contacto entre agua y material

• Línea Ecología: Los participantes de esta línea han realizado la una evaluación que permite establecer índices de afectación ecológica de tecnologías de aprovechamiento energético para la determinación relativa de la huella ecológica marina y en ecosistemas costeros, con énfasis en el Estado de Veracruz, donde han realizado la Evaluación geotécnica de sitios y susceptibilidad a procesos geólogo-geomorfológicos, levantamiento morfogenético del relieve, evaluación de tendencias morfodinámicas costeras-1973, 1986, 2000 y 2017 comprendidas entre Ciudad de Veracruz y Río Jamapa, 422 km

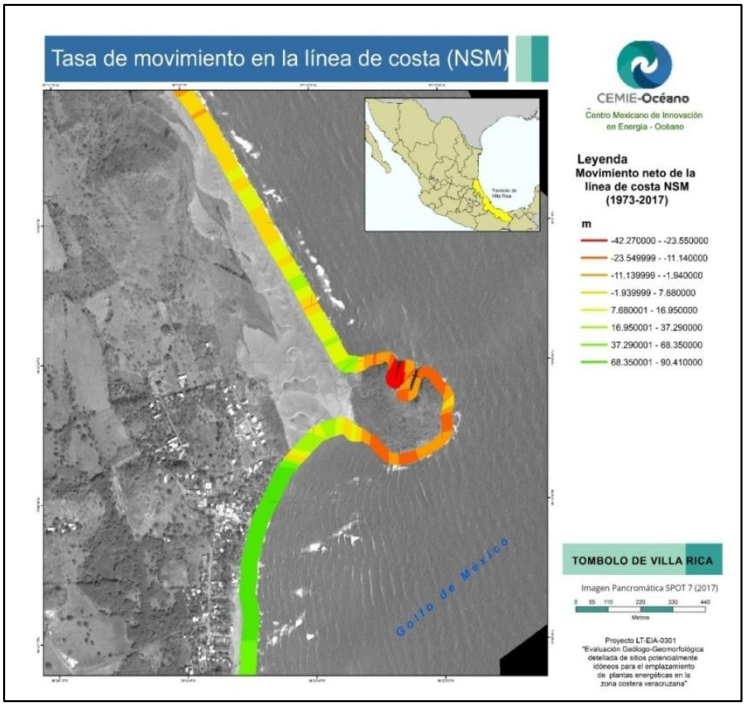


Figura 8. Variación de línea de costa, Veracruz

• Línea simulación numérica y física: fabricación de un prototipo de generación (tanque de oleaje) y sistema de propagación de oleaje tridimensional, en diciembre de 2017 inició la construcción del laboratorio de oleaje costero, en esta instalación se probarán los dispositivos WEC que actualmente se diseñan por parte de los participantes del CEMIE-Océano, a partir del primer semestre de 2019, cuando sea instalado el sistema de generación de oleaje, Figura 9

Línea de Difusión, Divulgación y Prensa: realizar, durante el cuarto año del proyecto, un congreso en México en el cual los participantes del CEMIE-Océano, divulguen, ante público general y especializado, los resultados adquiridos durante el desarrollo del proyecto, actualmente ha editado 3 libros, 2 boletines y diseñó y administra la página web del Centro, www.cemieoceano.mx

CONCLUSIONES

Durante el primer año y medio de trabajo del CEentro, los principales logros obtenidos son los siguientes: definición del consorcio CEMIE-Océano, adquisición de equipo oceanográfico, científico y de cómputo por más de 4 millones de dólares, Realización de 2 reuniones plenarias con los participantes del Centro, formación de 9 alumnos de licenciatura, 16 de maestría y en preparación 7 alumnos de doctorado, publicación de 15 artículos, 42 bases de datos, 7 atlas, 3 libros con el estado del arte de gradiente térmico, salino y almacenamiento e interconexión a la red eléctrica, así como atlas de mamíferos marinos de México e impacto de clima en las costas de México, creación y participación en redes sociales Facebook y Twitter, así como publicación de 3 boletines semestrales de las actividades del Centro.

Figura 9. Avances en construcción de tanque de oleaje y futuro sistema de generación

El proyecto CEMIE-Océano, actualmente en su cuarta etapa semestral, tuvo por parte de los árbitros nacionales e internacionales convocados por el fondo CONACyT-SENER, una excelente evaluación de su primer año y medio de actividades, esto permite inferir que la planeación realizada para el inicio del proyecto, el grupo humano e institucional que conforma el centro y los objetivos de cada una de sus líneas son los adecuados para lograr cumplir la visión general del centro, ser el núcleo multidisciplinario proveedor de investigación aplicada, desarrollo tecnológico e innovación, dirigidos a la extracción de las diversas formas de energía del océano, su conversión y distribución más importante de Latinoamérica.

REFERENCIAS

Silva et al, 2018, informes de avance 3era ministración, **CEMIE-Océano**

Posada, G., Silva, R., Delgado, A., Mendoza, E., Vega, B.E (2017), El Centro Mexicano de Innovación Energías Renovables del Océano: Avances y oportunidades, Congreso Asociación Mexicana de Infraestructura Portuaria, Veracruz, México.

www.cemieoceano.mx, (2018), Página de internet oficial del Centro Mexicano de Innovación en Energía del Océano, Instituto EPOMEX, Universidad Autónoma de Campeche.

IAHR AIIH
XXVIII CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA
BUENOS AIRES, ARGENTINA, SEPTIEMBREDE 2018

GESTIÓN DEL RIESGO ANTE INUNDACIONES EN ZONAS BAJAS DE TABASCO. UN ENFOQUE SOCIAL

González Villarreal Fernando J[1] Carbajal Barrera Joel[2] y Mendoza Mata Angélica[3]
[1, 2, 3] Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México. Circuito Escolar s/n, Ciudad Universitaria, Delegación Coyoacán. Ciudad de México. México. C.P. 04510, Teléfono +52(55)5623-3600 ext. 8624 y +52(55)5623-3500 ext. 1573. correos: fgv@pumas.iingen.unam.mx; jcb_joy07@yahoo.com.mx; amendozam@iingen.unam.mx

RESUMEN:
Tabasco es una entidad federativa de la República Mexicana que presenta una problemática muy importante en materia de desastres naturales, en particular inundaciones (Campos, Barceló, Díaz, Ramírez, 2011). Algunas causas de estasituación son las siguientes: 1) la ubicación geográfica, ya que se encuentra en una zona ciclogénica, con una alta presencia de fenómenos hidrometeorológicos; 2) la dispersión y ubicación de la población en zonas de riesgo; 3) una infraestructura creada por el hombre que ha interferido en los escurrimientos naturales; y 4) la red hidrográfica con mayor gasto hidráulico de todo el país, lo cual provoca un manejo de cuencas que requieren mayor atención en la planeación urbana, la producción agrícola, y la preservación ecológica. Esta investigación se relaciona con el estudio de las inundaciones desde una perspectiva de sostenibilidad entendiendo al socio-ecosistema de Tabasco como un solo ente, en el cual se aprecian interacciones socioambientales a diferentes escalas que denotan procesos socio-históricos que contribuyen a la ocurrencia de este tipo de eventos. La finalidad de tales estudios es diseñar propuestas de medidas adaptativas, tanto estructurales como institucionales, pero en este estudio nos inclinamos por las segundas y consideramos que la fortificación de las capacidades de las poblaciones es un punto trascendental para la reducción de la vulnerabilidad y el desarrollo de estrategias anticipativas más que reactivas.

ABSTRACT:
Tabasco is a federal entity of the Mexican Republic that presents a very important problem in the matter of natural disasters, in particular floods (Campos, Barceló, Díaz, Ramírez, 2011). Some causes of this situation are the following: 1) the geographical location, since it is located in a cyclogenic zone, with a high presence of hydrometeorological phenomena; 2) the dispersion and location of the population in risk areas; 3) an infrastructure created by man that has interfered with natural runoff; and 4) the hydrographic network with the greatest hydraulic expenditure in the whole country, which causes watershed management that requires greater attention in urban planning, agricultural production, and ecological preservation. This research is related to the study of floods from a sustainability perspective, understanding the socio-ecosystem of Tabasco as a single entity, in which socio-environmental interactions are appreciated at different scales that denote socio-historical processes that contribute to the occurrence of this type of events. The purpose of such studies is to design proposals for adaptive measures, both structural and institutional, but in this study we favor the latter and consider that the fortification of the capacities of the populations is a transcendental point for the reduction of vulnerability and development of anticipatory rather than reactive strategies.

PALABRAS CLAVES: *Vulnerabilidad, riesgo, medidas adaptativas*

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, nos encontramos en un escenario de cambio climático donde impera la incertidumbre sobre el futuro de los socioecosistemas de la tierra. Existe normatividad, por ejemplo, desde Naciones Unidas, que incita a los países a mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero a fin de evitar cambios antropogénicos "peligrosos" en el clima (Smit, Wandel, 2006), esto, porque son notorios los efectos de los cambios en el clima en prácticamente todo el mundo. Para el caso de Tabasco, son las inundaciones, los desastres que han imperado en las dos décadas recientes de manera más frecuente. Los impactos en términos económicos son un ejemplo de los estragos de las inundaciones (ver Tabla 1 y Figura 1).

Tabla 1.- Pérdidas anuales en el estado de Tabasco por inundaciones. (Elaboración propia con base en CENAPRED).

AÑO	MDP	USD
1999	2,500,00	134.63
2006	10.30	0.55
2007	31,871.26	1,716.28
2008	5,277.20	284.18
2009	2,465.30	132.76
2010	7,391.90	398.06
2011	10,304.50	554.90
2012	11.6	0.62
2013	561.7	30.25
2014	52.49	2.83
2015	1.7	0.09
2016	2.6	0.14
Totales	60,446.25	3,255.28

Figura 1.-Inundación en una vivienda en Comalcalco, Tabasco 2018.
Fuente: El Universal (2018).

Tabaco se localiza en la región sureste de la República Mexicana, su superficie territorial es de 24,661km2 representa el 1.3% del territorio nacional; concentra 33% de cuerpos de agua dulce del país (Salazar, 1996). En este artículo se estudia gran parte del sistema socioecológico del Estado de Tabasco en sus zonas bajas, cota 3 msnm y menor, (ver Figura 2).Una intensión de realizar el estudio se refiere a conocer los aspectos que caracterizan la vida de las comunidades en el ámbito social, económico, ambiental, político, cultural y demográfico, para que de esta manera se comience con una gestión del riesgo, determinando las necesidades de las localidades, reconociendo el componente de peligro que es considerado de origen natural y el componente de vulnerabilidad o de origen antrópico y por otra parte, identificando las capacidades y las fortalezas como base de un afrontamiento conjunto.

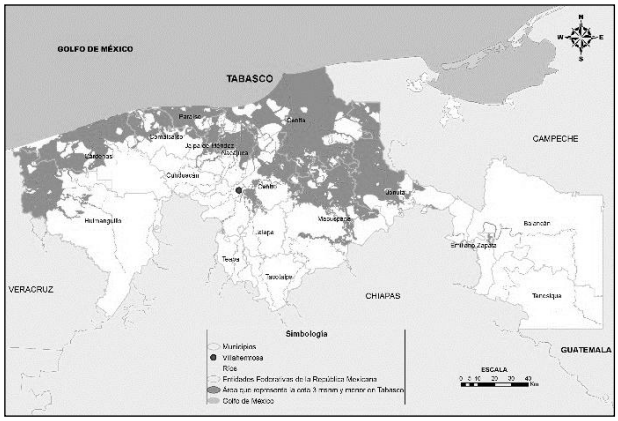


Figura 2.-Tabasco y sus zonas bajas, 3 msnm y menor

El hablar de afrontamiento conjunto por riesgo de inundación implica considerar a todos los "actores implicados" en el tema de las inundaciones para una población, un municipio, una región, un Estado. En esta investigación se consideran como actores implicados a una muestra de viviendas ubicadas en la cota 3 msnm o menor y que serían la parte representativa del total de viviendas asentadas en las condiciones de mayor exposición a los eventos hidrometeorológicos de la región; a las autoridades de los tres niveles de gobierno, representadas por las instancias gubernamentales directamente responsables de tratar con temas de agua y de protección a las poblaciones; a las instituciones académicas con trabajos de ciencia e investigación de carácter interdisciplinarioque desarrollan estudios sobre inundaciones en la zona; a las asociaciones no gubernamentales u organizaciones sin fines de lucro; y a empresas privadas que a través de sus servicios coadyuvan a la atención de situaciones relacionadas con la problemática en comento.

Se considera que en los desastres ocurridos por eventos de inundación, el ser humano cada vez tiene mayor injerencia, lo cual se traduce en el imperativo del análisis por aumento de la vulnerabilidad del sistema ante las amenazas. En este trabajo se analizan las inundaciones y sus efectos en términos de la dimensión socio-económica y nos enfocamos principalmente en las capacidades de la población. Consideramos que los componentes de la vulnerabilidad son la exposición, la sensibilidad y las capacidades. Estos componentes son frecuentemente interdependientes (Smit, Wandel, 2006, p. 286).

El trabajo se enmarca en un estudio de riesgo y desastres, en donde la vulnerabilidad es un componente del riesgo final. Se utiliza en el modelo de presión y liberación de los desastres para entender de manera global el rol central que juga la vulnerabilidad y la amenaza en la ecuación de riesgo de desastres (ver Figura 3), expuesto por Blaikie (1996).

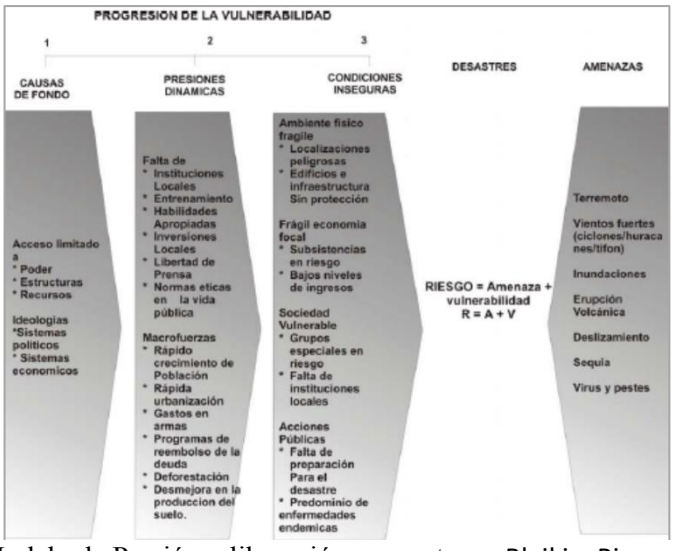


Figura 3. Modelo de Presión y liberación expuesto porBlaikie, Piers et al.(1996).

Existe evidencia de que las inversiones para la atención y mitigación de las inundaciones continúan realizándose en obras de infraestructura de protección; por ejemplo, en 2015, el Estado de Tabasco recibió 1,012.5 millones de pesos, cifra que representó 6.2% de los recursos otorgados por el Fondo de Desastres Naturales (FONDEN). (CENAPRED, 2015). Aun con esto, la percepción de la población continua siendo de "nulo apoyo" porque no ven materializado el recurso del FONDEN y se continúan apreciando las capacidades que surgen desde lo local y no son fortalecidas por otros actores que son corresponsables de la gestión del riesgo por inundaciones.

La vulnerabilidad se entiende, en general, como un factor de riesgo interno que matemáticamente está expresado como la factibilidad de que el sujeto o sistema expuesto sea afectado por el fenómeno que caracteriza la amenaza (Cardona, 2001). El IPCC ilustra la vulnerabilidad a través de tres conceptos básicos, exposición, sensibilidad y capacidad de adaptación (Engle, 2011a). La exposición es la medida en que el sistema está físicamente en peligro; la sensibilidad es qué tan afectado está un sistema después de estar expuesto al estrés; y la capacidad de adaptación representa la capacidad del sistema para prepararse y adaptarse al estrés, disminuyendo los impactos negativos y aprovechando las oportunidades (como se cita en Engle, 2011b). De acuerdo con Engle, (2011c) la vulnerabilidad, es ampliamente definida como susceptibilidad al daño y es entendida en el campo de la sostenibilidad al analizar interacciones socioecológicas, ya que se deben estudiar los sistemas humanos y ambientales y sus interacciones en conjunto.

OBJETIVO

Identificar y caracterizar los componentes de vulnerabilidad social que conforman la dinámica y la interacción social en zonas bajas del Estado de Tabasco, en especial, localidades ubicadas en la cota 3 msnm y menor, con la finalidad de diseñar propuestas de medidas adaptativas, para prevenir y responder ante los eventos de inundación.

METODOLOGÍA

Se utilizaron sistemas de información geográfica, visualizados en programas computacionales y se identificaron zonas bajas (cota 3 msnm y menor) y localidades con recurrencia histórica a eventos de inundación, para ello, se creó una base de datos con información hemerográfica mediante una revisión desde el año 1999 hasta 2014. Se realizaron 3 visitas con la finalidad de identificar la problemática que presentan los pobladores de las localidades ubicadas en zonas bajas y conocer los mecanismos de convivencia que se han desarrollado como medidas adaptativas. Se realizaron con previo consentimiento, inspecciones en las viviendas para ubicar el nivel medio de la lámina de inundación, y conocer el tiempo de permanencia del agua dentro de las viviendas, y registrar las características de acción que ofrece la población ante los eventos. En la visita se aplicaron 2 instrumentos, el primero fue una entrevista que permitió obtener información referente a la convivencia con las inundaciones por parte de la población ubicada en zonas de riesgo. El segundo instrumento fue una encuesta, que tuvo la finalidad de rescatar la percepción de la población con respecto al tema de los desastres naturales ocasionados por fenómenos hidrometeorológicos.

La fuente de datos son las propias personas quienes informan acerca de sus experiencias ante eventos de inundación, algunos de los temas que se trataron con ellas, fueron los siguientes: a) frecuencia de las inundaciones; b) afectaciones de las inundaciones, en la vivienda, en el abasto de alimentos, en la salud, en materia de seguridad, etc., c) afrontamiento individual o colectivo; d) comunicación o incomunicación por inundaciones; e) adaptación, resignación o constante frustración por pérdidas ante eventos de inundación; f) percepción del riesgo; g) conocimiento de apoyos, planes, programas o proyectos emanados del gobierno; h) balance para un escenario futuro.

RESULTADOS

Las localidades de análisis presentan capacidad de adaptación pero de forma no estructurada y no fortalecida por apoyo institucional. La exposición, las sensibilidades y las capacidades del sistema las presentamos a continuación, (ver Tabla 2).

Tabla 2.- Componentes de la vulnerabilidad y propuesta de medidas adaptativas.

	Sensibilidades	Capacidades
Exposición: Inundaciones	- Déficit de pesca, de animales y de cosechas - Desabasto y - Encarecimiento	- Almacenes comunitario - Estufas (solares) - Sistema de distribución de alimentos y despensas
	- Centros de trabajo anegados e inaccesibles	- Apoyo económico - Seguros - Transporte fluvial de apoyo
	- Aumento de enfermedades	- Ambulancia fluvial - Campañas de salud - Dispensarios, consultorios comunitarios - Estudios de calidad del agua y propuesta de saneamiento
	- Interrupción del ciclo escolar - Afectaciones a los centros educativos - Deserción de la plantilla docente	- Escuelas en palafitos - Reforzamiento de la plantilla académica - Reposición de equipamiento escolar - Transporte escolar - Incorporación de temas de cultura del agua
	- Se presentan robos - Existe carencia de información sobre las rutas de evacuación	- Boletín de emergencias - Mapas de vías de comunicación - Patrullas de vigilancia - Plan logístico de atención de desastres y evacuación - Sistemas de alerta
	- Incomunicación	- Telefonía satelital, red telegráfica de emergencia y red de transporte fluvial
	- Se generan conflictos por la atención a los damnificados	- Empoderamiento de la comunidad - Determinación de los realmente afectados
	- Las instalaciones se ven afectadas.	- Construcción de parques comunitarios
	- Pérdidas materiales	- Seguros contra inundaciones
	- Deforestación	- Manejo agroforestal Programa de ordenamiento ecológico
	- No existe cultura de prevención	- Asambleas comunitarias con presencia de autoridades
	- Subestimación de la amenaza	- Campañas informativas en las comunidades. - Apoyo institucional interdisciplinario
	- Pérdidas parciales o totales - Temor, tristeza, indiferencia, esperanza, unión	- Solidaridad - Compromiso de gobierno - apoyo psicológico

DISCUSIÓN

Pelling (1998) afirma que la vulnerabilidad a las inundaciones es producto de dos situaciones, por un lado el discurso político, o más claramente, los aspectos que tienen que ver con la gestión, la interacción social o el emprendimiento de acciones; y por otro lado el cambio ambiental y considera que la reducción de la vulnerabilidad está en función de un óptimo proceso de toma de decisiones sobre el uso y la asignación de recursos.

El estudio de la vulnerabilidad tiene que ser una construcción a partir de varias ventanas de conocimiento. Los componentes de exposición, sensibilidad y capacidad adaptativa, propios de la vulnerabilidad, se desarrollan en un contexto que es determinado por procesos histórico-regionales.

Es importante el estudio de la vulnerabilidad contemplando diversas líneas de investigación, por un lado, el estudio de las características con las cuales cuenta el elemento expuesto y que determina su grado de vulnerabilidad y por otro lado, el estudio de los fenómenos hidrometeorologicos desde una visión de la ingeniería hidráulica que genera modelos para el estudio de las cuencas y los escurrimientos que ahí se presentan y desde la hidrología para estudiar el comportamiento de las lluvias.

CONCLUSIONES

Los montos por afectaciones en los diversos sectores van en aumento, los eventos de inundación que esto refleja, se están presentando con mayor recurrencia.

Los eventos de inundación serán cada vez más frecuentes y con mayor intensidad pues son reflejo entre otras cosas de la variabilidad climática.

El balance entre el costo de los impactos por eventos de inundación generalmente es mayor en contraste con el monto de inversión que se propone para la prevención, mitigación y atención de los efectos de las inundaciones.

El estudio integral del tema de las inundaciones no puede dejar de lado la opinión y la percepción de las propias personas que constantemente se ven inmersas en situaciones de crisis.

Otro aspecto trascendente de la gestión del riesgo es atender las problemáticas en cualquiera de sus etapas, en un evento de inundación sería actuar en el antes, en el durante y en el después, pero, dando prioridad a la prevención.

REFERENCIAS

Blaikie, Piers et al. (1996) "Vulnerabilidad: El entorno social, político y económico de los desastres". La Red. IT Perú. Tercer Mundo, Editores. Colombia. http://www.desenredando.org/public/libros/1996/vesped/

Campos, J.A. Barceló, L.A. Díaz, G.A. and Ramírez, M.A. (2011).*Vulnerabilidad y Protección civil*. Red Academica Sobre Desastres en Tabasco. Villahermosa Tabasco 2011, pp. 27-35

Cardona, O. D. (2003). "La necesidad de repensar de manera holística los conceptos de vulnerabilidad y riesgo". Una crítica y una revisión necesaria para la gestión. http://www.desenredando.org, Bogotá, Colombia: Centro de estudios sobre desastres y riesgos. Universidad de los Andes.

CENAPRED, (2014). *Impacto Socioeconómico de los Desastres en México*. http://www.cenapred.gob.mx/es/Publicaciones/archivos/21072014Resumen_Ejecutivo_Impacto.pdf.13

El Universal. (2018) Fuertes lluvias inundan Tabasco. http://www.eluniversal.com.mx/estados/fuertes-lluvias-inundan-tabasco

Engle, N. L. (2011). "Adaptive capacity and its assessment. Global Environmental Change". 21:647-656. http://dx.doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2011.01.019

Pelling, M. (1998). "Participation, social capital and vulnerability to urban flooding in Guyana". https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1328(199806)10:4<469::AID-JID539>3.0.CO;2-4

Salazar, J.C. (1996). *Compendio Monográfico de la Historia de Tabasco*. Villahermosa Tabasco 1996, pp. 91-94.

Smit, B. y Wandel, J. (2006). "Adaptation, Adaptive Capacity and Vulnerability" Global Environmental Change, 16 March (2006), pp. 282–292. http://dx.doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2006.03.008

IAHR **AIIH**

XXVIII CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA
BUENOS AIRES, ARGENTINA, SEPTIEMBRE DE 2018

PROPUESTA PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA RESILIENCIA ANTE INUNDACIONES EN TABASCO, MÉXICO

Carrillo Sosa Juan Javier, González Villarreal Jorge Fernando y Samayoa Navarrete Luis

Universidad Nacional Autónoma de México, México, 52155 56233500 ext. 1659
JCarrilloS@iingen.unam.mx, FGonzalezV@iingen.unam.mx; SNavarreteL@iingen.unam.mx

RESUMEN:

El estado de Tabasco en el sureste mexicano ha tenido tres grandes inundaciones en años recientes 1999, 2007 y 2010, con daños acumulados en los últimos 20 años que suman casi 60 mil millones de pesos (3,200 millones de dólares). La mitad de esos daños ocurrieron tan solo en 2007 afectando a 1.4 millones de personas. A partir de la inundación de 1999 se realizaron tres estudios de planeación en los que se ha apoyado la gestión de riesgo por inundaciones en el estado: El Plan Integral contra Inundaciones (PICI), El Plan Hídrico Integral de Tabasco (PHIT) y el Estudio para aprovechar mejor el agua y reducir el riesgo por inundaciones en Tabasco (PROHTAB). De estos estudios se han derivado acciones tanto estructurales como no estructurales, pero a pesar de los esfuerzos y de las cuantiosas inversiones que se han efectuado (de 2015 a la fecha se han invertido 990 millones de dólares) prevalece un riesgo residual que pone en riesgo a casi medio millón de habitantes, cifra que se incrementa si se considera que el sistema de protección está diseñado para un periodo de retorno de 100 años. Algunos cálculos indican que por ejemplo, de ocurrir un evento de lluvia asociado a un Tr de 500 años, el número de habitantes afectados tan solo en la zona conurbada de Villahermosa sería de 684,482. Es por ello que es crucial una estrategia de resiliencia para reducir el impacto que el riesgo residual pueda tener en la población

ABSTRACT:

Tabasco State, located in the southeast of Mexico has had three great floods in recent years: 1999, 2007 and 2010; with accumulated damages generated in the last 20 years are about 3,200 MM USD. The half of these damages happened just in 2007 harming over 1.4 million people. Since the 1999 flood three planation studies were made to support the State's flood risk management: The Integral Plan against floods (PICI), The Tabasco's Integral Hydrological Plan (PHIT) and the Study for a better utilization of water and decrease the floods risk in Tabasco (PROHTAB). From these studies, structural and nonstructural actions have come but despite all efforts and huge investments done (from 2015 until now are 990 MM USD invested) a residual risk is remaining which causes danger for almost half a million of inhabitants, number that is rising considering that the protection system is designed for a return period of 100 years. Some calculations indicate that, for example, in case of rainfalls associated with a 500 years Tr, the inhabitants affected would be 684,482. This is why it is fundamental to get a resilience strategy to reduce that the residual risk impact could have among the population.

PALABRAS CLAVES: *resiliencia, riesgo inundaciones*

INTRODUCCIÓN

La resiliencia como parte de una estrategia global del desarrollo tiene su origen en el Marco de Acción de Hyogo, celebrado en Japón en 2005, durante la Conferencia Mundial sobre la Reducción de Desastre, aunque ya anteriormente las naciones han planteado su preocupación por el manejo del riesgo desde el Marco Internacional de Acción del Decenio Internacional para la Reducción de los Desastres Naturales de 1989, la Estrategia de Yokohama para un Mundo Más Seguro, adoptada en 1994 y la Estrategia Internacional para la Reducción de los Desastres de 1999.

Por ello una definición que podemos adoptar es que es "la capacidad de un sistema, comunidad o sociedad expuestos a una amenaza para resistir, absorber, adaptarse y recuperarse de sus efectos de manera oportuna y eficaz, lo que incluye la preservación y la restauración de sus estructuras y funciones básicas", (*UN-ISDR*, 2009). La resiliencia de una comunidad, desde el punto de vista de la gestión de riesgos, es su capacidad de recuperación después de un evento catastrófico, sin embrago, el concepto de la comunidad totalmente resiliente a desastres es un concepto ideal ya que ninguna comunidad podrá estar jamás completamente a salvo de peligros naturales y antropogénicos. (*Twigg*, 2007)

En la tercera Conferencia Mundial de las Naciones Unidas celebrada en Sendai (Japón) en 2015, se adopta el Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres 2015-2030 el cual es el instrumento sucesor del Marco de Acción de Hyogo y cuya pretensión es el aumento de la resiliencia de las naciones y las comunidades ante los desastres. Este Marco de Sendai se concibió para dar un mayor impulso a la labor mundial en relación con la prevención de los desastres naturales, la preparación para casos de desastre y la mitigación de sus efectos. El Marco de Sendai propuso cuatro prioridades mediante las cuales los Estados, y sus distintos órdenes de Gobierno; podrían adoptar medidas específicas para la construcción de la resiliencia. Estas esferas prioritarias son:

1. Comprender el riesgo de desastres
2. Fortalecer la gobernanza del riesgo de desastres para gestionar dicho riesgo
3. Invertir en la reducción del riesgo de desastres para la resiliencia
4. Aumentar la preparación para casos de desastre a fin de dar una respuesta eficaz y para "reconstruir mejor" en los ámbitos de la recuperación, la rehabilitación y la reconstrucción

Por lo anterior, en el presente trabajo se muestra una propuesta para la construcción de la resiliencia en el estado de Tabasco partiendo de las prioridades establecidas en el Marco de Sendai y como estrategia fundamental para el cumplimiento del objetivo 11 del Desarrollo Sostenible: "Ciudades incluyentes, seguras, sostenibles y resilientes".

EL RIESGO EN TABASCO

A partir de la inundación de 1998 se han realizado tres documentos de planeación en los que se ha apoyado la gestión de riesgo por inundaciones en el estado: El Plan Integral contra Inundaciones (PICI), El Plan Hídrico Integral de Tabasco (PHIT) y el Estudio para aprovechar mejor el agua y reducir el riesgo por inundaciones en Tabasco (PROHTAB). En los tres casos se estudiaron las causas de las inundaciones; para ello se analizó el riego partiendo de la ecuación básica para su determinación (Ec. 1), se caracterizaron las amenazas o peligros, se estudiaron los factores que hacían vulnerables a los elementos y se estableció su grado de exposición.

La función que expresa el riesgo es la siguiente:

$$R = VPE \qquad [1]$$

donde,

R= Riesgo
V=Vulnerabilidad
P= Peligro o amenaza
E= Exposición al peligro o amenaza

Como resultado de los realizados desde entonces, en la actualidad se conocen los principales factores que influyen en la existencia del riesgo por inundaciones en el estado. Estos factores se han resumido en la figura 1.

Figura 1.- Factores de riesgo en Tabasco.

De los estudios mencionados se han derivado diversas acciones tanto estructurales como no estructurales que se pueden enlistar a continuación de las cuales la mayoría se han implementado a la fecha:

Estructurales

- Sobrelevación de bordos y construcción de muros de protección
- Construcción de estructuras derivadoras para desviar parte del caudal de las avenidas hacia llanuras inundables con menos afectaciones
- Restablecimiento de intercomunicación lagunaria (Lagunas Zapotes-Laguna Don Julián)
- Mejoramiento de las políticas de operación de presas
- Construcción de estructura con compuertas para control del gasto en una bifurcación
- Dragado y desazolve de cauces en zonas estratégicas

No Estructurales

- Manejo de las cuencas altas
- Plan de ordenamiento territorial
- Monitoreo, pronóstico y alerta temprana

RIESGO RESIDUAL

Las acciones y estrategias para la reducción del riesgo por inundación nunca lo eliminan del todo, siempre prevalece un riesgo denominado residual que genera daños y afectaciones que normalmente afectan a las zonas de mayor vulnerabilidad (Figura 2). A pesar de esos esfuerzos y de las cuantiosas inversiones que se han efectuado (de 2015 a la fecha se han invertido 18,528 millones de pesos, equivalente a 990 millones de dólares) prevalece un riesgo residual que pone en riesgo a casi medio millón de habitantes, cifra que se incrementa si se considera que el sistema de protección está diseñado para un periodo de retorno de 100 años y de presentarse un evento de lluvia de mayores dimensiones, por ejemplo uno asociado a un Tr de 500 años, el número de habitantes afectados tan solo en la zona conurbada de Villahermosa se estima en más de 680 mil personas.

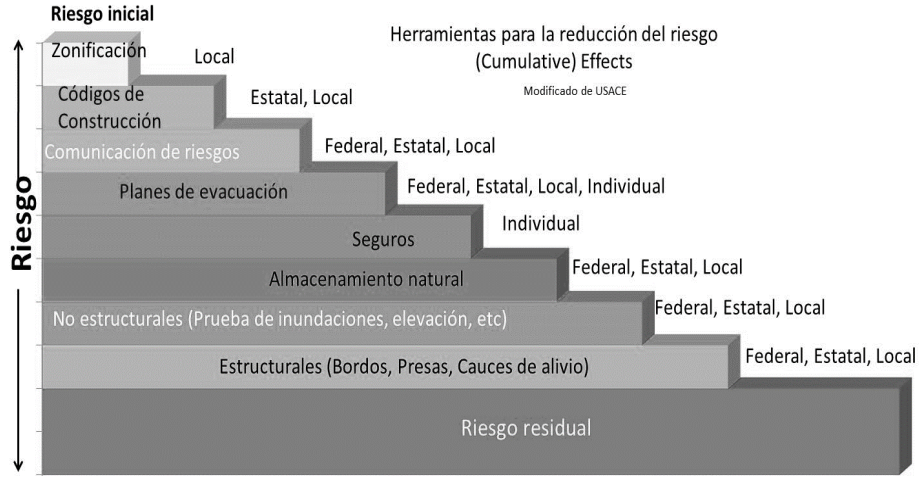


Figura 2.- Herramientas para la reducción de riesgo.

PROPUESTA PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA RESILIENCIA EN TABASCO

La propuesta elaborada para construir la resiliencia ante inundaciones en el estado de Tabasco parte de las cuatro prioridades del Marco de Sendai (Figura3). Para cada una de las esferas de prioridad se identificaron acciones específicas que se muestran en el cuadro 1.

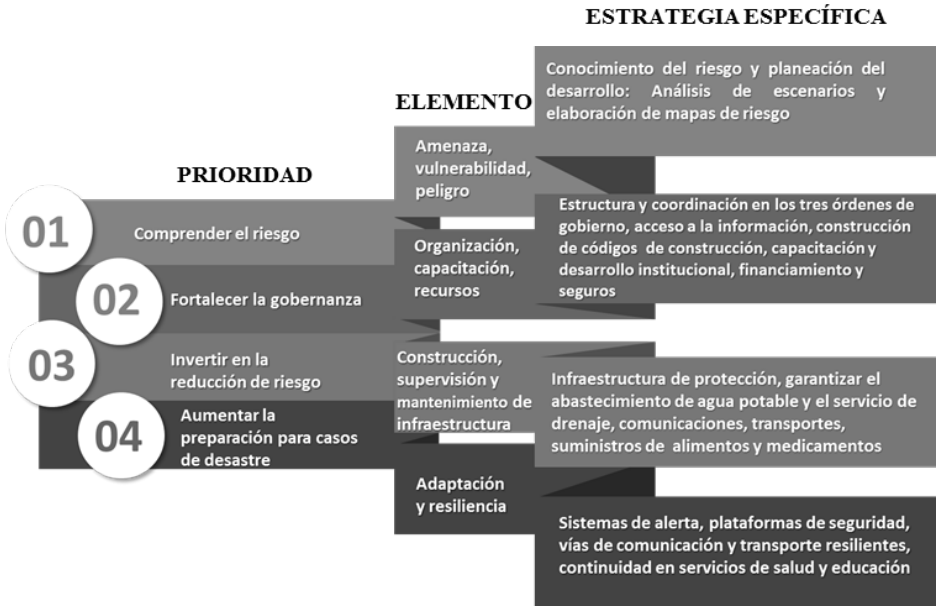


Figura 3.- Resumen de la estrategia de resiliencia. Elaboración propia.

CONOCIMIENTO DEL RIESGO

Se elaboró un diagnóstico del riesgo actual para los escenarios de lluvia asociada a un Tr de 500 y de 1000 años. Mediante el modelo matemático para simulación de flujo bidimensional de código libre, Iber, (Universidad de Cataluña, 2016) se realizó la simulación del tránsito de las avenidas para un periodo de retorno de 500 años en una zona que comprende al municipio de Centro (cuyo principal núcleo de población es la ciudad de Villahermosa) y parte del municipio de Nacajuca. Los resultados se presentan en la figura 4.

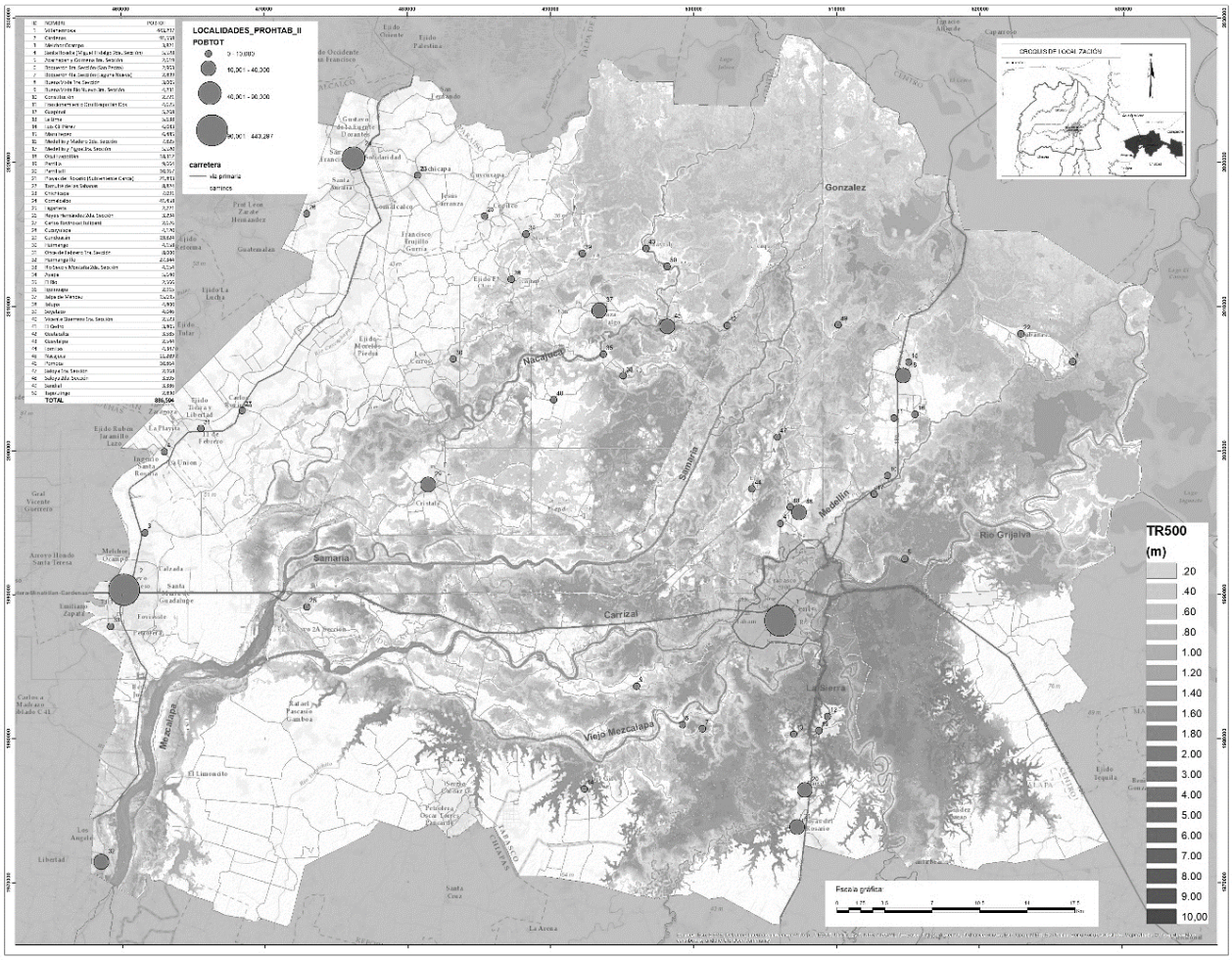


Figura 4.- Zona inundable con una lluvia asociada a un Tr de 500 años.

Para este escenario estudiado se tienen 37 localidades con una población total de 684,482 habitantes afectados (Tabla 1). De esas localidades, del orden de 440,000 se ubican en la ciudad de Villahermosa, otros 120,000 se encuentran dispersos en las localidades de Huimanguillo, Cunduacán, Jalpa de Méndez, Nacajuca, Pomoca y Parrilla,y el resto, otros 120,000 habitantes aproximadamente están dispersos en las 30 localidades restantes. Además de que muchas localidades se ubican en zonas de riesgo, existe una gran dispersión de la población como ya se había indicado anteriormente.

Tabla 1.- Población afectada en un escenario de inundación asociado a un Tr de 500 años.

LOCALIDAD	(HAB)	LOCALIDAD	(HAB)
Acachapan y Colmena 1ra. Sección	2,619	Huimanguillo	27,344
Boquerón 1ra. Sección (San Pedro)	2,963	Ayapa	5,640

Boquerón 4ta. Sección (Laguna Nueva)	2,899	El Río	2,566
Buena Vista 1ra. Sección	3,005	Iquinuapa	2,915
Buena Vista Río Nuevo 3ra. Sección	4,231	Jalpa de Méndez	15,695
Constitución	2,721	Jalupa	4,800
Guapinol	5,768	Soyataco	4,046
La Lima	5,638	Vicente Guerrero 1ra. Sección	2,523
Luis Gil Pérez	6,083	El Cedro	3,805
Macultepec	6,485	Guatacalca	3,585
Medellín y Madero 2da. Sección	7,825	Guaytalpa	2,544
Medellín y Pigua 3ra. Sección	5,520	Lomitas	4,347
Parrilla	9,664	Nacajuca	11,289
Parrilla II	10,967	Pomoca	10,864
Playas del Rosario (Subteniente García)	21,893	Saloya 1ra. Sección	2,968
Cucuyulapa	4,120	Saloya 2da. Sección	3,595
Cunduacán	19,824	Sandial	3,386
Huimango	4,158	Tapotzingo	2,890
Villahermosa	443,297		
		TOTAL AFECTADOS	**684,482**

FORTALECER LA GOBERNANZA

En México, el Estado es el responsable de las acciones para garantizar la seguridad de la población en caso de desastres (Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos y Ley General de Protección Civil), a través del Consejo de Seguridad Nacional, en donde participan representantes de las distintas Secretarias de Estado y los Gobiernos Estatales; y del Sistema Nacional de Protección Civil (Figura 5).

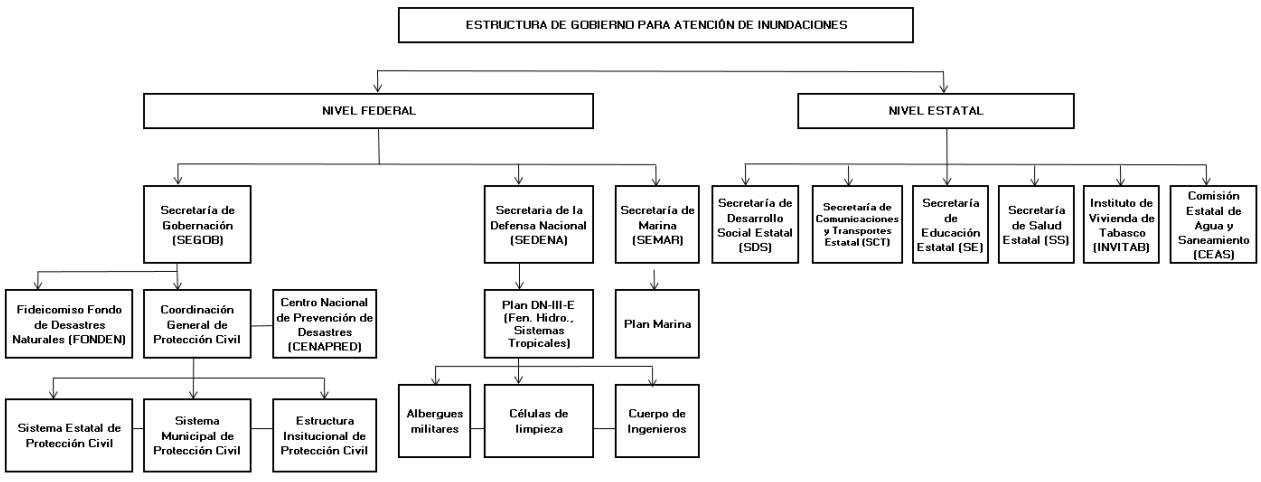


Figura 5.- Estructura de Gobierno para la protección Civil.

El estado gestiona acciones y recursos para la atención de emergencias y, en el caso específico de las inundaciones, la Secretaria del Medio ambiente, a través de la Comisión Nacional del Agua, es quien se encarga de la coordinación de las acciones para reparar los daños y restablecer las condiciones de seguridad en las localidades afectadas.

Existen también varios grupos científicos que se albergan principalmente en universidades del país que han trabajado en este tema, tal es el caso del Centro del Agua para América Latina y el Caribe, albergado en el Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, o el Centro Interamericano de Recursos del Agua, conformado por varios investigadores principalmente de la Universidad Autónoma del Estado de México, entre otros.

Una acción importante que permitirá fortalecer gobernanza en materia de seguridad hídrica y construcción de la resiliencia en México, es la creación en México de un centro regional categoría 2 de la UNESCO en materia de seguridad hídrica, aprobado por la ONU a finales de 2017, y con la participación del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México y el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua y donde se pretende abordar entre otros temas el de la creación y fortalecimiento de la resiliencia en el país ante desastres.

INVERTIR EN LA REDUCCIÓN DE RIESGO Y AUMENTAR LA PREPARACIÓN PARA CASOS DE DESASTRE

Como ya se ha mencionado, se han realizado fuertes inversiones en infraestructura de protección contra inundaciones en el Estado de Tabasco, pero se requiere continuar estas inversiones para crear zonas seguras en áreas principalmente rurales donde los habitantes de las localidades que quedan incomunicadas en las planicies inundadas y sin posibilidad de tener acceso a agua potable, adquirir víveres o comprar medicamentos; cuenten con áreas para su resguardo y donde se concentre ayuda en caso de desastres. Se pensó en la creación de plataformas de seguridad que consisten en terraplenes ubicados a una cota por encima del nivel máximo que alcanzará la inundación; además garantizar el transporte terrestre mediante una red primaria de comunicación que les permita a los habitantes de un grupo de localidades concentrarse en un sitio cercano, para ello es necesario sobre-elevar caminos y carreteras estatales para mantener la comunicación terrestre entre las localidades afectadas.

En cuanto al abastecimiento de agua con calidad potable, de acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (WHO, 2003), en un caso extraordinario, como lo es una inundación, la dotación de agua potable mínima que puede suministrarse por habitante equivale a 20 l/hab/día, esta cantidad de agua se denomina dotación de supervivencia y supone un abastecimiento en un período corto de tiempo (semanas) que puede realizarse mediante plantas potabilizadoras portátiles con capacidad para abastecer a una localidad con esta dotación.

Para garantizar el suministro de agua durante una inundación se ha planteado que en cada centro comunitario de atención de emergencias ubicado en las plataformas de seguridad se cuente con una planta potabilizadora portátil. Estas plantas pueden producir hasta 100 litros por minuto. Con base en la dotación de 20 l/hab/día y considerando una población a abastecer de 684,482 se tiene que el requerimiento para potabilización de agua es de 158.4 l/s. Se supuso que las plantas portátiles podrían operar durante 6 horas diarias por lo que la capacidad requerida de producción es de equivalentes a 638 l/min en total, con lo cual se requieren de 7 plantas (Figura 6)

De acuerdo con los análisis realizados se distinguen 4 zonas principales en donde en cada una de ellas se ubica un terraplén y se construye un centro de atención comunitario que cuenta con almacén de víveres: agua y alimentos; dispensario médico, con medicamentos y consulta médica; un centro de comunicación con teléfono satelital y zonas para resguardo temporal de ganado. (Figura 7).

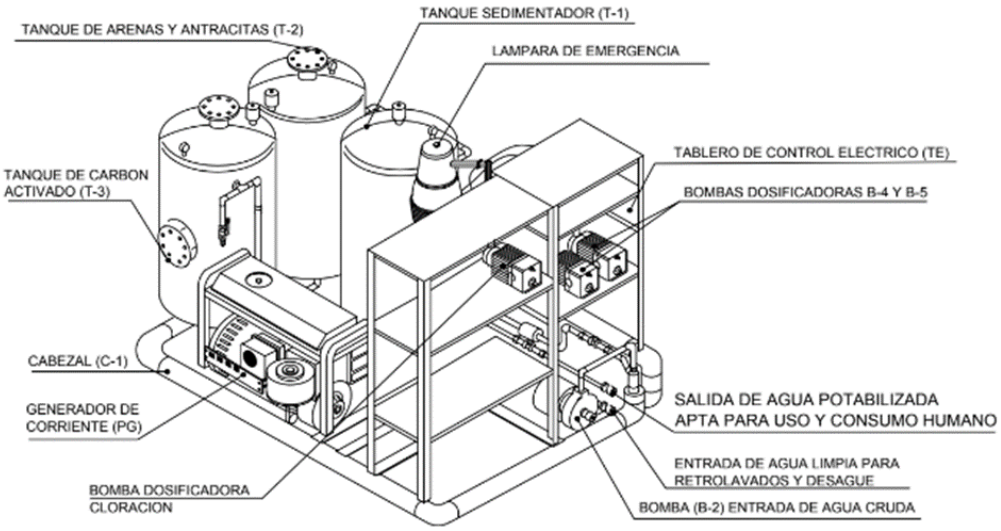


Figura 6- Esquema de planta potabilizadora portátil (Cortesía de ESAL)

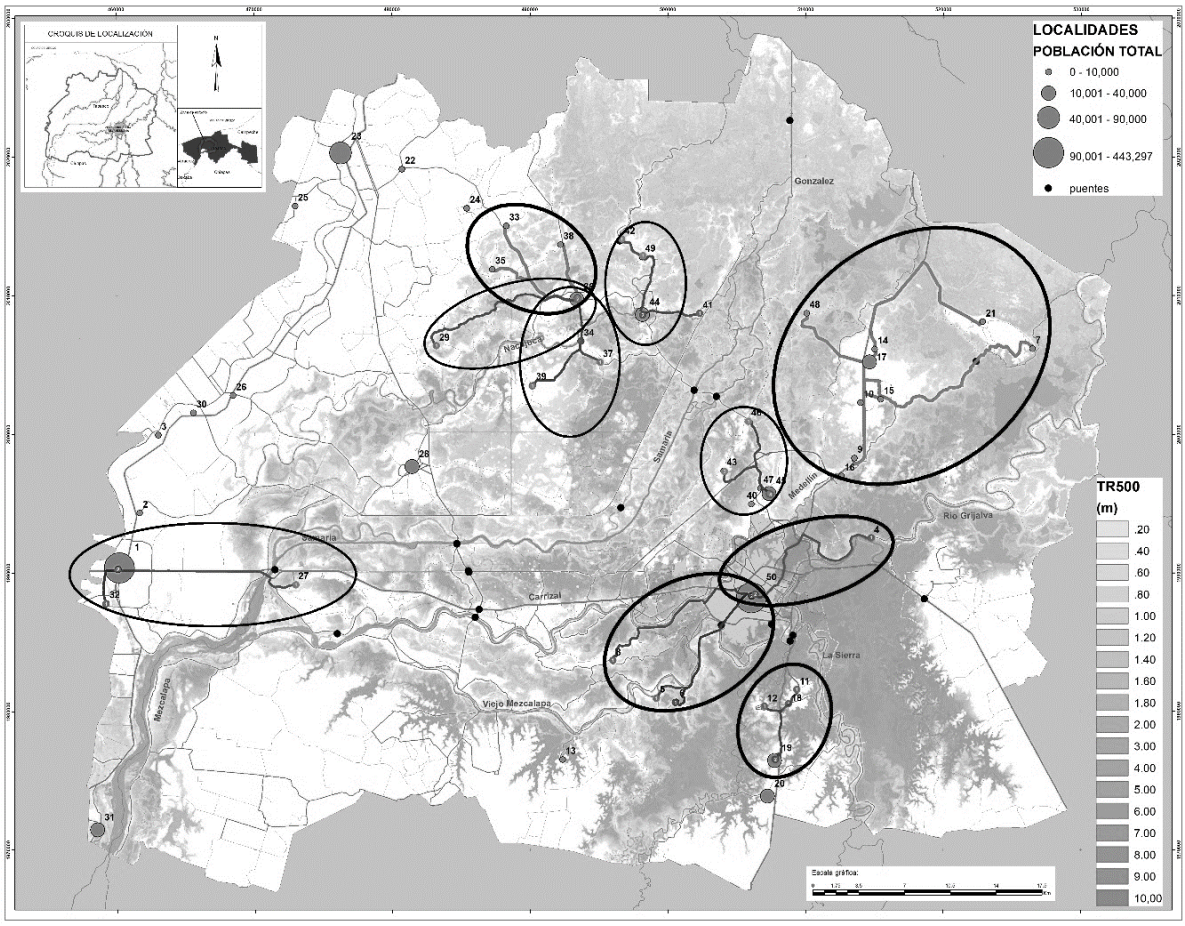


Figura 7.- Identificación de plataformas de seguridad para la atención de emergencias

CONCLUSIONES

La construcción de la resiliencia requiere de una coordinación estrecha entre varios representantes del gobierno, la sociedad civil, la iniciativa privada y la academia.

La inversión de recursos enfocados a la prevención, la planeación y la construcción de la resiliencia, permite reducir los daños y aumenta la recuperación de las condiciones estables de un entorno urbano. De acuerdo con la Secretaría de Gobernación, entre 2005 y 2010, la relación entre las asignaciones de recursos al Fondo Nacional para Prevención de Desastres (FOPREDEN) respecto al Fondo Nacional para Atención de Desastres (FONDEN) fue de tan solo 2.4% (1,368 millones de MXN contra 56,772 millones de MXN), es decir, se ha dado poca importancia a la inversión para la prevención y mayor atención a la restauración o remediación cuando un desastre ocurre.

La adaptación a las condiciones naturales locales representa una solución viable con respeto a soluciones enfocadas a modificar el entorno mediante la construcción de infraestructura. Para el caso de estudio, de implementarse la estrategia de construcción de resiliencia redundaría en la reducción de riesgo para casi 650 mil personas además de otros beneficios secundarios (Figura 7).

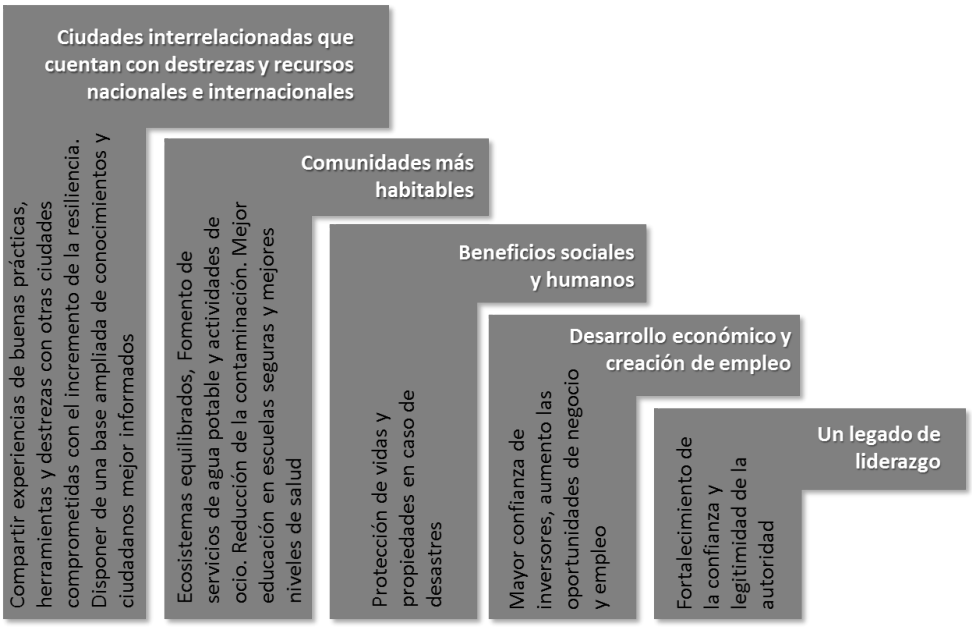


Figura 7.- Beneficios de la construcción de la resiliencia.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA)"*Estudio de factibilidad del proyecto integral contra inundaciones en Tabasco*". México, 2000.

González V. Fernando, Carrillo Sosa J. "*Plan Hídrico Integral de Tabasco*", Universidad Nacional Autónoma de México, elaborado para la Comisión Nacional del Agua, México, 2010.

González V. Fernando, Carrillo Sosa J. "*Estudio para el proyecto hidrológico para proteger a la población de inundaciones y aprovechar mejor el agua (PROHTAB), en el estado de Tabasco*", Universidad Nacional Autónoma de México, elaborado para la Comisión Nacional del Agua, México, 2015.

UN-Habitat at the World Conference on Disaster and Risk Reduction (WCDRR), *World Conference on Disaster Risk Reduction, 2015*, Sendai Japan. https://unhabitat.org/urban-themes/resilience/

UN-ISDR. "*Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres 2015-2030"*, Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres, Ginebra, 2015.

Universidad de A Coruña, Universitat Politécnica de Catalunya, Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería, "*IBER Modelo matemático bidimensional para la simulación del flujo en lámina libre y procesos de transporte en ríos y estuarios"* (2016), España. http://www.iberaula.es

Guy Howard, Jamie Bartram, "*Domestic Water Quantity, Service Level and Health"*, World Health Organization, WHO-ONU, 2003.

Twigg ,John "*Characteristics of a Disaster-resilient Community: A Guidance Note",* Disaster Risk Reduction Interagency Coordination Group, UCL Hazard Centre, UK, 2007.

GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS NO CÓRREGO DO AMBRÓSIO, CAPITÓLIO-MG

Ana Cláudia Nascimento e Silva, Afrânio Costa Pereira[1], Gabriel Soares da Silva[2], Germano de Oliveira Mattosinho[3], Lucimar Rodrigues de Oliveira e Vinny Yuri Oliveira[4]

[1] IFMG. Depto de Engenharia Civil, Piumhi, Brasil. afraniocpereira@gmail.com
[2] IFMG. Depto de Engenharia Civil, Piumhi, Brasil. gssilva1110@gmail.com
[3] IFMG. Depto de Engenharia Civil, Piumhi, Brasil. germano.mattosinho@ifmg.edu.br
[4] IFMG. Depto de Engenharia Civil, Piumhi, Brasil. vinnyyuri4@gmail.com
Chefe do Departamento de Meio Ambiente, Prefeitura de Capitólio-MG, Brasil. ana.vilela88@gmail.com
Chefe do Departamento de Agricultura e Pesca, Prefeitura de Capitólio-MG, Brasil. lucimaror@yahoo.com.br

RESUMO:

Este artigo aborda o plano de gestão da bacia Ambrósio, no município de Capitólio- Minas Gerais, visando melhorias qualitativas e quantitativas das águas. O plano de manejo da bacia foi realizado pelo Projeto Ambrósio através de uma gestão integrada, com participação de proprietários rurais, instituições municipais, estaduais e federais assim como é idealizado pelo Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SINGREH). Nos últimos 2 anos notou-se uma mudança do cenário desta bacia com a ocorrência de escassez de água no período de seca devido ao aumento do consumo e intempéries climáticas. Supõem -se que com a execução das ações estabelecidas por este programa, dentre elas, a proteção dos corpos hídricos, o aumento da cobertura vegetal e a implantação de práticas de manejo integrado de floresta, solo e água, ocorra maior recarga hídrica no lençol freático e melhoria da qualidade das águas.

Palavras-chave: gestão ambiental; gestão de recursos hídricos; políticas públicas, conservação quanti-qualitativa de águas.

ABSTRACT:

This article adresses the management plan of Ambrósio Basin, in the town of Capitólio - Minas Gerais, aiming to improve the water qualitatively and quantitatively. The plan for basin management was done by Ambrósio Project with an integrated management and participation of rural residents, municipal, state and federal institutions just like it is idealized by National Water Resources Management System (SINGREH). In the last two years it was noticed a change in the condition of the basin with a water shortage during the drought period as a result of the increasing comsumption and inclement weather. It is assumed that the implementation of the actions established on this program, such as water bodies protection, the increase of plant cover and the implementation of an integrated management practices for forest, soil and water, will bring up water recharge in the grounwater and improvement of water quality.

Keywords: environmental management, water resources management**;** public policies; quantitative and qualitative conservation of waters.

INTRODUÇÃO DA PROPOSTA A SER APLICADA NA SUB-BACIA

Com o aumento da degradação ambiental aliado à crescente demanda de água surgiu a necessidade de repensar a estratégia de gestão em recursos hídricos considerando os aspectos ambientais, sociais e econômicos.

O Brasil evoluiu no processo quanto à Gestão de Recursos Hídricos, pois ao implantar a Lei de Recursos Hídricos deu o primeiro passo instituindo o mecanismo amplo de gestão das águas, criou os instrumentos como outorga, cobrança e enquadramento dos rios, estabelecendo as condições de contorno para as cidades quanto à contaminação dos rios (Tucci, 2008).

A Sub-bacia do Ambrósio é afluente do Rio Piumhi e pertence a Bacia São Francisco, a qual tem gerado polêmica no país devido ao embate político e social em torno da obra de transposição das águas do Rio São Francisco. Desde 2001, através do Decreto Presidencial que instituiu o Projeto de Conservação e Revitalização da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco o governo busca incentivar projetos deste cunho na Bacia São Francisco (Machado, 2008).

O projeto, ao qual esse estudo está inserido, se iniciou-se em janeiro de 2015 com a elaboração do diagnóstico da Sub Bacia do Ambrósio. No ano de 2017 conquistou a adesão nos programas SOS São Francisco, Pro-Mananciais e Produtor de Águas, representado respectivamente pelos órgãos IEF, COPASA e ANA.

Todos os programas são voltados a proteção hídrica, através da recuperação e preservação das matas ciliares, proteção de nascentes e cursos de água, redução dos níveis de poluição decorrentes dos processos de sedimentação e eutrofização, implantação do saneamento básico e do Pagamento por Serviços Ambientais (PSA). O PSA é considerado uma forte estratégia ambiental, pois este recurso auxilia na construções e manutenção das técnicas a serem implantadas para a adequação ambiental da propriedade como um todo. (Jardim & Bursztyn, 2015).

Além das ações previstas nos programas que serão executadas na bacia, é realizado um trabalho socioambiental com o município para integração com a população, através de eventos nas escolas, treinamentos e cursos. A conservação e preservação deste manancial é de suma importância local, pois este é responsável pelo abastecimento de água do município.

OBJETIVOS DA PROPOSTA

Este programa utiliza da estratégia de gestão pública integrada com diversas instituições para atingir seu objetivo principal, a melhoria da quantidade e qualidade das águas na bacia do Ambrósio, através do desenvolvimento de diversas ações para conservação do solo, da vegetação e da água.

Nesta primeira etapa do projeto serão desenvolvidas as técnicas conservacionistas para readequação das estradas, dentre elas a construção de “barraginhas” (Figura 7) e de terraços em nível com o objetivo de reduzir o carregamento de sedimentos para o manancial e aumentar a recarga hídrica da bacia.

O programa também incentiva o uso sustentável na agricultura por meio de práticas ecológicas e desenvolvimento de técnicas de manejo na pecuária com o apoio técnico do Departamento de Agricultura do município. Além destes, promovem-se cursos e oficinas de capacitação dos produtores rurais para estes enfoques.

Para a proteção deste manancial será realizado o cercamento e plantio de mudas nativas nas Áreas de Preservação Permanente hídricas (APP’s) de acordo com a lei federal nº 12.651, de 25 maio de 2012, buscando o isolamento e recuperação da mata ciliar nas áreas de proteção do manancial.

DIAGNÓSTICO

Como já foi dito anteriormente o diagnóstico foi realizado em 2015 através de estudo bibliográfico, levantamento de campo e geoprocessamento. A partir deste trabalho foi elaborado o planos de ações buscando técnicas para minimizar os danos ambientais à sub-bacia.

A Figura 1 apresenta uma visão macro da sub-bacia do Ambrósio georreferenciada no mês de setembro de 2017 usando os softwares ArcGis e Google Earth, os mapas apresentados neste artigo foram gerados através do tratamento de imagens SRTM disponibilizados pelo Projeto Topodata do Instituto Nacional de Pesquisa Espaciais.

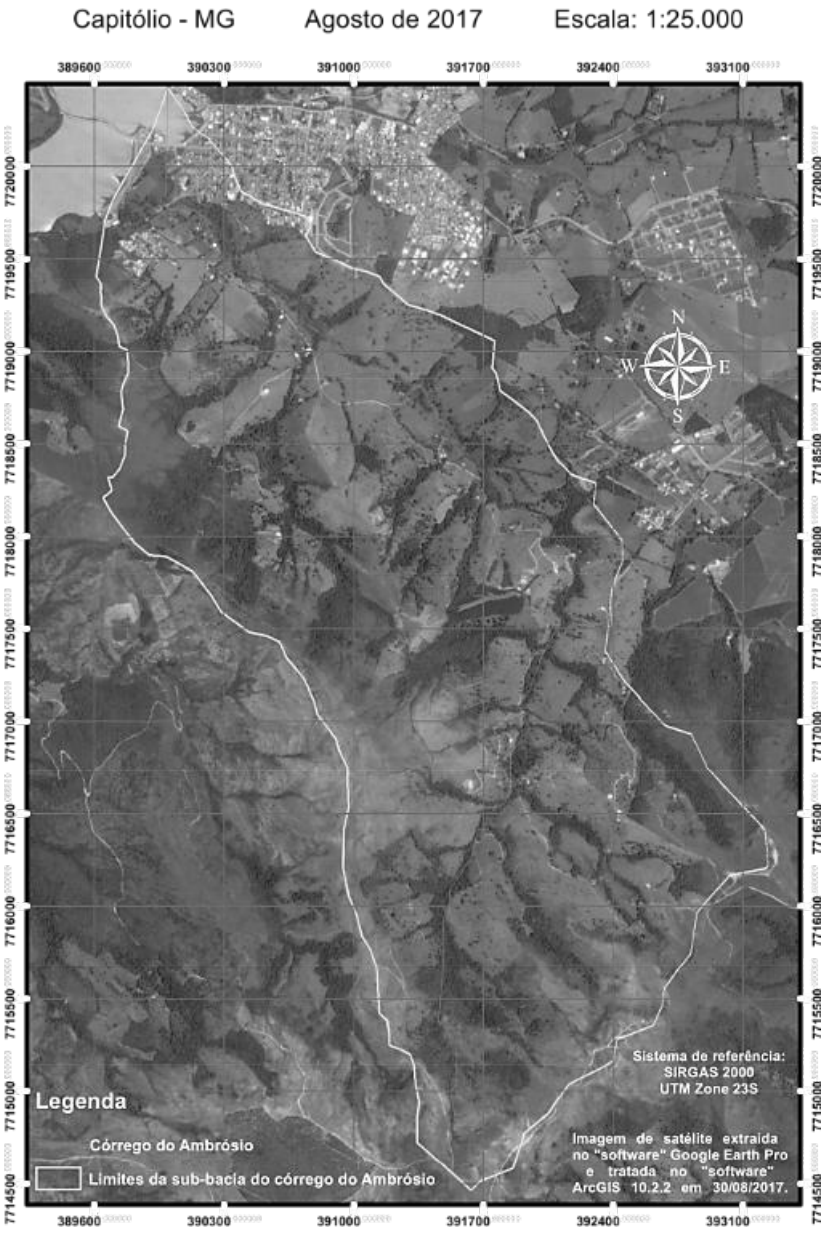


Figura 1.- Imagem de satélite georreferenciada da sub-bacia.

A sub-bacia apresenta área total de 953,17 hectares com estimativa de 40 nascentes perenes ou intermitentes. De forma geral, ocorre floresta nativa do bioma Cerrado remanescente nas margens do manancial e campo rupestre nos topos de morro (Figura 1). As nascentes e afluentes

apresentam-se em ravinas com consideráveis profundidades, chegando a 4 metros de desnível em alguns pontos.

Segundo o Mapa de Declividade da Bacia do Ambrósio (Figura 2), observou-se que as nascentes e os topos de morro encontram-se nas áreas mais íngremes da bacia, com variação de declividade de 20 a 40% nas nascentes e de 40 a 80% nas áreas de recarga. Já o curso principal encontra-se inserido em uma topografia mais suave, com variação de 0 a 20%.

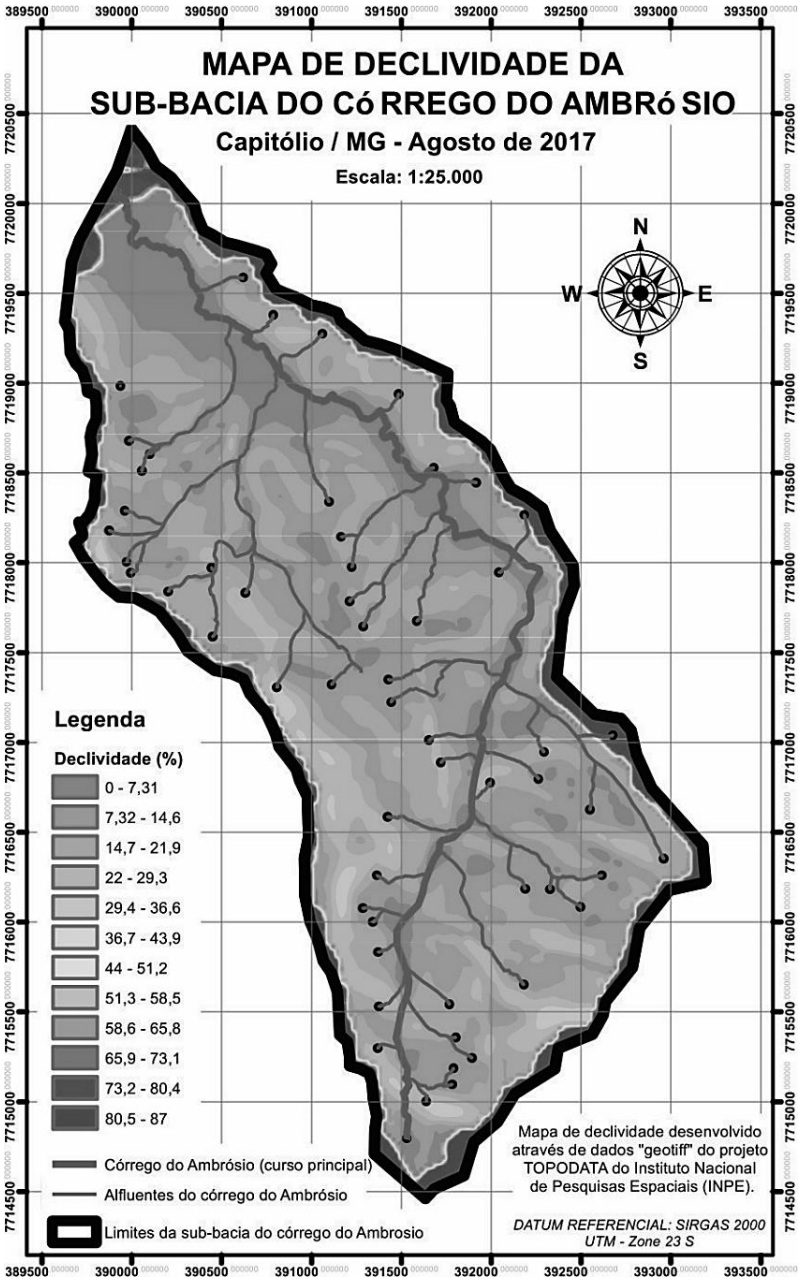


Figura 2.- Mapa de Declividade da Bacia do Ambrósio.

O uso inadequado do solo aliado aos fatores naturais, tais como, ocorrência de chuvas torrenciais e alta declividade da bacia (Figura 2), vem intensificando a degradação ambiental na bacia nos últimos anos, sendo possível identificar diversos pontos de processos erosivos.

Segundo o histórico de vazão da bacia, nos últimos dois anos o período de seca foi crítico. Dificultando portanto o abastecimento do município e das propriedades rurais devido à escassez de água, com a redução significativa da vazão nos corpos hídricos e desaparecimento de nascentes. Na Figura 3 é possível observar a insuficiência de água na barragem onde é realizada a captação pela empresa responsável pelo abastecimento do município e alguns proprietários rurais.

Figura 3.– Foto do local onde é realizada a Captação 1 da COPASA, em 05 de agosto de 2017. Nota-se clara escassez de água no referido período.

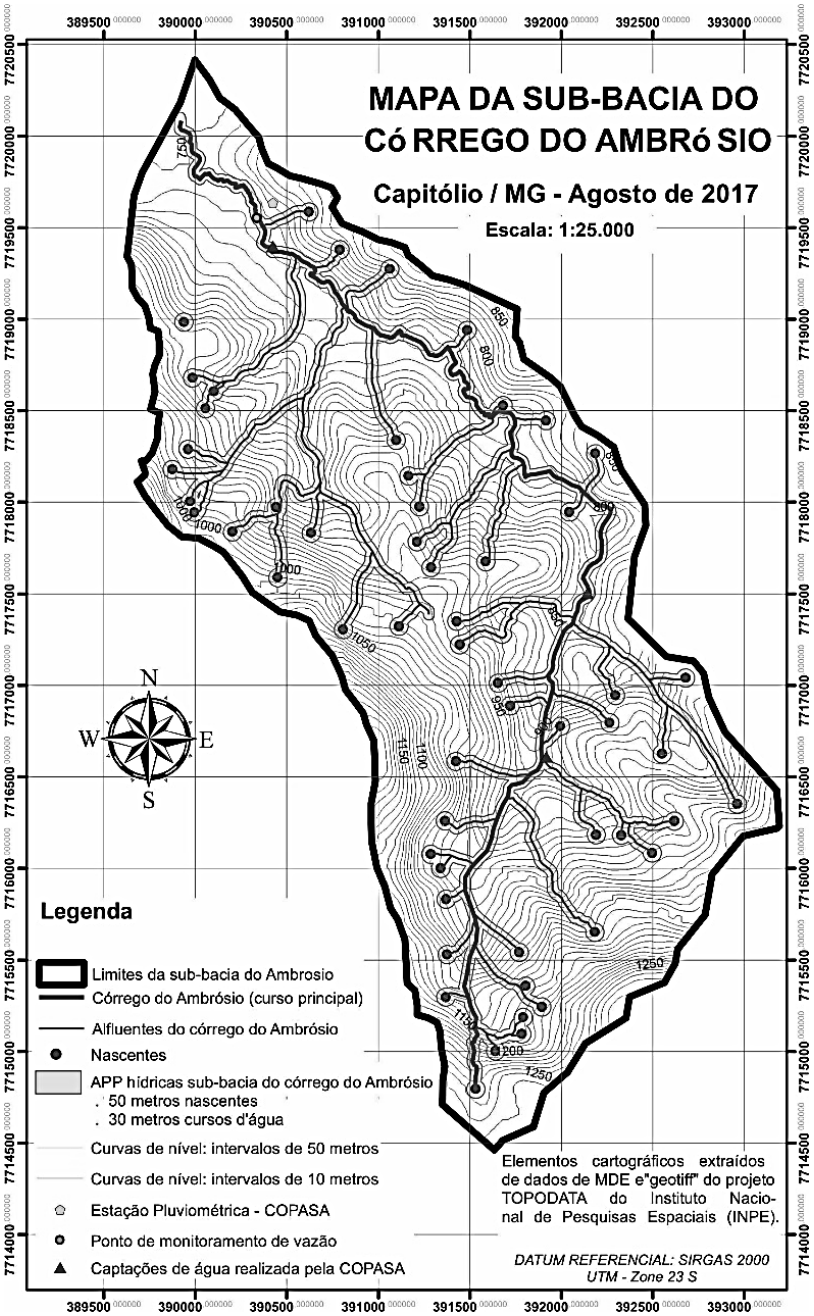


Figura 4.- Imagem de Satélite da sub-bacia em destaque o curso principal.

Em análise bacteriológica da água realizadas pela COPASA na captação na parte de baixa altimetria do córrego (Figura 4) ocorreu alta concentração de coliformes fecais e totais nos últimos 4 anos. Os fatores que têm contribuído para este quadro são a ausência de proteção dos cursos de água e de estruturas de saneamento básico nas propriedades.

O levantamento dos dados de uso e ocupação foi realizado através de sensoriamento remoto e trabalho de campo realizado em agosto de 2017, o qual mostra que a atividade predominante nesta bacia é a pastagem, representada pela ocupação 46,43% da área.

Gráfico 1.- Descrição das atividades segundo os dados de uso e ocupação do solo.

Uma das principais causas de degradação das pastagens nas regiões de clima tropical e subtropical do Brasil são as práticas inadequadas de manejo do pastejo (Dias-Filho, 2011).

As áreas de recarga e de proteção hídrica encontram-se dominadas pela atividade pecuária, apresentando, de forma geral, uma pastagem exaurida nas áreas de 40 a 80% declividade e um manancial desprotegido no curso principal, onde a topografia é mais suave (Figura 5). Na Figura 6 é possível identificar sulcos de drenagem profundos na pastagem em uma área de alta declividade.

Figura 5.- Curso principal da Bacia do Ambrósio.

Figura 6.- Sulcos de drenagem profundos em área de pastagem.

METODOLOGIA DE ESTUDO E EXECUÇÃO

O plano de ações a ser executado na bacia foi definido a partir da metodologia do Programa Produtor de Águas da ANA, o qual prevê um apoio técnico e financeiro para viabilizar o Pagamento por Serviços Ambientais (PSA) e a execução de ações que têm como principal objetivo o aumento da cobertura vegetal, a proteção dos mananciais, ações em saneamento ambiental e práticas de conservação do solo.

A coordenação do projeto e o diagnóstico da sub-bacia estão sendo desenvolvidos pelo Departamento de Agricultura e Meio Ambiente da Prefeitura Municipal de Capitólio em parceria com órgãos governamentais. Na tabela 1 observa-se a descrição das instituições integradas no programa e sua respectiva função.

Tabela 1.- Descrição dos parceiros do Projeto Ambrósio.

INSTITUIÇÕES PARCEIRAS	FUNÇÃO NO PROJETO
Prefeitura Municipal de Capitólio	Coordenação do projeto, apoio técnico e realização do pagamento por serviços ambientais.
ANA	Apoio técnico e financeiro no desenvolvimento das ações do Programa Produtor de Águas.
COPASA	Disponibilidade de dados, apoio técnico e financeiro nas ações que serão desenvolvidos no Programa Pro Mananciais.
IFMG	Apoio técnico no planejamento e desenvolvimento das ações na bacia.
IEF – MG	Apoio técnico no planejamento e desenvolvimento das ações na bacia.
FAEMG	Assistência técnica com cursos para aperfeiçoamento de práticas de conservação do solo e água.
EMATER – MG	Assistência técnica para adequação de estradas e diagnóstico da bacia.

No mês de setembro de 2017, realizou-se diagnóstico e plano de ações para a readequação das estradas, com o apoio de técnicos da EMATER. Em fevereiro de 2018 iniciou-se a execução das práticas mecânicas de conservação nas estradas indicadas no plano (Figura 7). Na tabela 2 observa-se o cronograma das ações dos programas Pro Mananciais e Produtor de Águas.

Figura 7.– Barraginha construída no dia 06 de fevereiro.

Tabela 2.- Cronograma de ações do Projeto Ambrósio.

AÇÕES À EXECULTAR	DESCRIÇÃO	PRAZOS
Cercamento de matas-ciliares	Isolar as Áreas de Preservação Permanente hídricas (APP's) de acordo com a lei federal nº 12.651, de 25 maio de 2012.	Ago / 18
Plantio de mudas nativas	Será realizado através de um estudo de um Projeto Técnico de Reconstituição da Flora	Out / 18
Curso de Recuperação de Nascentes	Curso promovido pelo SENAR para recuperação de proteção de nascentes degradadas.	Jun / 18
Curso de Agricultura Orgânica	Curso promovido pelo SENAR para capacitação de profissionais para implantar a agricultura orgânica na propriedade rural de forma sustentável e lucrativa.	Out / 18
Construções de barraginhas	Pequenas bacias de terraços em nível para amenizar o processo erosivo e aumentar a infiltração.	Em execução
Construções de terraceamento	Consiste em criar barreiras de terra seguindo as curvas de nível em terreno com declive com o objetivo de reter a água pluvial	Em execução
Construção de aceiros	Isolamento estratégico das áreas com maiores registros de queimadas.	Em execução
Adequações de estradas	Diversas intervenções para amenizar o processo erosivo e melhorar o acesso as propriedades rurais.	Em execução
PIP - Projeto Individual de Propriedade	Estudo indicando as principais ações para recuperação ambiental da propriedade como um todo.	2019
PSA - Pagamento de Serviços Ambientais	Apoio financeiro para os provedores de serviços ambientais como forma de compensa-los pelos custos de oportunidades associados à restrição de uso dos recursos naturais.	2019

Nos dias 18, 19 e 20 de junho foi promovido pelo SENAR o Curso de Recuperação e Proteção de Nascentes no manancial. A nascente recuperada durante o curso apresentava-se assoreada devido a um escoamento de água com de grande volume e alta energia proveniente de uma área de recarga com alto grau de degradação. Foi realizada uma intervenção para o desassoreamento e proteção da nascente, finalizando a obra com uma captação de água de 2.333 litros por dia (Figura 9).

Figura 8.- Nascente na bacia do Ambrósio recuperada e protegida após intervenção.

RESULTADOS

Com a implantação da metodologia do Programa Produtor de Águas da Agência Nacional de Águas, visamos obter melhorias tanto na qualidade quanto na quantidade de água do Córrego Ambrósio.

A metodologia do Programa Produtor de Água foi eficaz no projeto Conservador de Águas implantado em Extrema - MG, o qual é referência nacional, através da implantação de técnicas conservacionistas para atenuar o assoreamento dos cursos de água, reduzir o escoamento de água e consequente aumentar a taxa de infiltração e recarga na bacia (Oliveira, 2008).

O projeto prevê o início do Pagamento por Serviços Ambientais para 2019, sendo esta uma importante estratégia de incentivo aos produtores rurais. Como o benefício é coletivo e as práticas conservacionistas geram despesas, o PSA é uma forma de compensar o produtor pelas externalidades positivas resultantes de suas boas práticas agrícolas (Jardim, 2015). Supõem-se que com o início das renumerações ocorra maior adesão e interesse dos produtores rurais ao Projeto.

A recuperação da mata ciliar nas Áreas de Preservação Permanente e áreas de recarga tem como principal objetivo remediar a situação crítica das áreas de proteção do manancial, que vem sofrendo o processo de desmatamento irracional para a implantação das atividades econômicas. A forte relação multifuncional entre a água e a mata nativa é evidenciada no ciclo hidrológico o que leva à necessidade de desenvolvimento de estratégia de conservação integrada das águas e florestas nativas (Braga, 2005).

O solo, a água e a floresta devem ser utilizados como recurso econômico, porém necessita-se assegurar as condições de renovação e preservação dos recursos naturais. A partir dos princípios da agricultura ecológica é possível estabelecer um diálogo entre os conhecimentos técnicos e a experiência dos produtores para que sejam recriadas interações mais harmônicas entre a ação antrópica e seu meio ambiente (Rodrigues, 2009). Com a divulgação e valorização da agroecologia na bacia os produtores rurais podem desenvolver alternativas de cultivo mais sustentáveis.

Quanto às práticas mecânicas, já iniciou-se as construções das barraginhas para readequação das estradas (Figura 7). Essa técnica é utilizada para o controle de taxa de escoamento superficial e infiltração de água no solo, com objetivo de amenizar o processo erosivo do solo (Carvalho & Kato & Lima, 2017). As bacias de captação promovem a recarga do lençol freático, favorecendo a manutenção de nascentes e a revitalização de mananciais com água de boa qualidade (EMATER, 2010).

AGRADECIMENTOS

Ao IFMG – Campus Avançado Piumhi pelo apoio.
À Prefeitura Municipal de Capitólio pelo apoio.
À Comunidade do Ambrósio por abraçar o Projeto.
À COPASA pela disponibilidade de dados da bacia.
À EMATER-MG pelo apoio técnico.

REFERÊNCIAS

Braga, R.A.P. (2005) "Avaliação dos instrumentos de políticas públicas na conservação integrada de florestas e águas, com estudo de caso na bacia do Corumbataí – São Paulo". Tese de Doutorado (Engenharia Civil – Hidráulica) – Escola de Engenharia de São Carlos/USP, São Carlos, São Paulo.

Carvalho, H.E.S. (2017) "Capacidade de infiltração de barraginhas em dois solos do Distrito Federal". Dissertação (Mestrado em Agronomia). xi, 64 f., il. — Universidade de Brasília, Brasília.

Dias-filho, M. B. (2011**)** "Degradação de pastagens: processos, causas e estratégias de recuperação". *4. ed. rev., atual. e ampl*. Belém, PA, 2011b.

EMATER - MG. (2005). "Bacias de captação de enxurradas. Série Meio Ambiente". Disponível em:<http://www.emater.mg.gov.br/doc/intranet/upload/MATERIAL_TECNICO/baciascapta%C3%A7%C3%A3oenxurradas.pdf> Acesso em: 31 de maio de 2018.

Tucci, C. E.M. (2015) *Hidrologia: Ciência e aplicação – 4ª edição*. Porto Alegre. Ed. UFRGS/ABRH, 2015.

Jardim, M.H., Bursztyn, M.A. (2015). "Pagamento por Serviços Ambientais na Gestão de Recursos Hídricos: o Caso de Extrema (MG)". *Revista de Engenharia Sanitária Ambiental*, v. 20, n. 3, p. 353-360.

MACHADO, A. T. da M.. A construção de um programa de revitalização na bacia do Rio São Francisco. Estud. av., São Paulo, v. 22, n. 63, p. 195-210, 2008.

Oliveira, A. H., Lima, G.C., Silva, M.L.N., Freitas, D.A.F., Silva, M.A., Pereira, P.H., Santos, D.G., Veiga, F. (2008) "Implantação de práticas conservacionistas em áreas agrícolas e estradas, objetivando a recarga de água na sub-bacia das Posses, município de Extrema, MG". *In: Anais do 18º Congresso de Pós-graduação da UFLA, 1º Encontro de Engenharia de Sistemas e 4º Workshop de Laser e Óptica na Agricultura.* Universidade Federal de Lavras, Lavras, p.354-9.

Rodrigues, **A.C.C., Ribeiro, Á.E.M**. (*2009*) "Resgate das Estratégias e Alternativas de Uso da Água por Famílias Rurais da Sub-Bacia do Rio dos Cochos, Semi-Árido Mineiro". *Revista Brasileira de Agroecologia, [S.l.], v. 4, n. 2, dec. 2009. ISSN 1980-9735.*

Tucci, C. E.M. (2015) *Hidrologia: Ciência e aplicação – 4ª edição*. Porto Alegre. Ed. UFRGS/ABRH, 2015.

TOPODATA (2017) "Banco de dados Geomorfológicos do Brasil". Disponível em: http://www.dsr.inpe.br/topodata/ Acesso em: 11 de julho de 2017.

IAHR AIIH
XXVIII CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA
BUENOS AIRES, ARGENTINA, SEPTIEMBRE DE 2018

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA INFORMÁTICA PARA EL USO INTEGRADO Y SOSTENIBLE DEL ALMACENAMIENTO HÍDRICO

Ximena A. Lemaitre R.[1], Germán R. Santos G.[2], Gerald A. Corzo P.[3], Héctor A. Angarita C.[4]

[1]Escuela Colombiana de Ingenieria, Colombia, ximena.lemaitre@escuelaing.edu.co, [2]Escuela Colombiana de Ingenieria, Colobmia, german.santos@escuelaing.edu.co, [3]Institute for Water Education IHE, Holanda, gerald.corzo@gmail.com, [4]The Nature Conservancy TNC, Colombia, flector@gmail.com.

RESUMEN:

La gestión del agua es un problema complejo que se relaciona con variables humanas y físicas que son difíciles de predecir. Hay variables culturales, sociales y humanas como prácticas agrícolas, crecimiento de las ciudades y otras, que son importantes y complejas de representar dentro de las interacciones de asignación del agua con el sistema hidrológico.

Esta investigación presenta un nuevo sistema novedoso pero simple que integra la información de las variables sociales e hidrológicas de la cuenca en un sistema en línea para el apoyo de decisiones. El concepto desarrollado hasta ahora representa el sistema del río Coello en Colombia, y permite simular y compartir ideas de modo que se pueda alcanzar un nivel de acuerdo entre los actores. Aparte de esto, el sistema se hace de código abierto de manera que se pueda configurar otra cuenca hidrográfica e incluso se puedan conectar otros sistemas de modelación hidrológica.

ABSTRACT:

Water management is a complex problem that relates to human and physical variables that are very hard to predict, there is a cultural and social and human driven variables (Agricultural practices, Cities growth and others) that are hard to capture into the complex interactions of the water allocation and the hydrological system.

This research presents a new novel yet simple system that integrates information from river basin social and hydrological variables in an online system for decision support. The concept developed so far represents the Coello river system in Colombia, and allows to simulate and to share ideas providing a level of agreement between actors that can be achieved. Aside of this, the system is made open source such that other river basin can be set up and even other hydrological modelling systems can be plugged in

PALABRAS CLAVES:

Modelo de asignación de agua, Manejo de recursos hídricos, programa de código abierto.

INTRODUCCIÓN

La gestión del agua es un problema complejo que se relaciona con variables humanas y físicas. Los modelos para representar estos complejos sistemas que han sido desarrollados fluctúan desde sistemas de apoyo a la decisión (Johnson, Williams, & Kirshen, 1995) hasta sistemas de apoyo a la discusión, como los modelos basados en juegos serios (Craven, Angarita, Corzo Perez, & Vasquez, 2017).

Sin embargo, aún existen variables culturales, sociales y humanas (Prácticas agrícolas, crecimiento de las ciudades y otras) que son difíciles de representar dentro de las interacciones complejas de la distribución del agua y el sistema hidrológico. Los modelos actuales como WEAP (Figueroa & Escobar, 2015), permiten una gran variedad de interacciones sin embargo, no se dispone de información espacio-temporal de las prácticas agrícolas, un espacio interactivo para la toma de decisiones en línea o soluciones cuasi (sociales) orientadas.

Igualmente, la incertidumbre en la toma de decisiones requiere herramientas que simulen escenarios para mejorar la distribución de los recursos hídricos. La mayoría de los programas computacionales (*software)* de simulación de recursos hídricos comerciales se han desarrollado alrededor de representaciones bastante complejas (Johnson et al., 1995), y adicionalmente no permiten fácilmente la optimización basada en múltiples criterios ni la incorporación flexible de la intervención humana en el funcionamiento de los diversos sistemas hídricos, y por lo tanto, implementarlas dentro de los sistemas reales de gestión del agua se ha convertido en una ardua tarea.

En Colombia, las estimaciones de IDEAM de la demanda de agua de las actividades socio-económicas están representadas principalmente por el riego, el consumo interno, industrial, la minería, la ganadería y los servicios (IDEAM, 2010). Así mismo, Colombia tiene cinco macrocuencas, una de ellas es la cuenca del Río Magdalena, dentro de la cual se encurta la cuenca del río Coello, la cual suple la mayor parte de la demanda hídrica en el país. Por lo que, en 2010, el Gobierno Nacional a través del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial adoptó la Política Nacional para la Gestión Integral de Recursos Hídricos (PNGIRH), con el apoyo de la embajada de Holanda. En el cual se establecieron los objetivos, estrategias, metas, indicadores y líneas de acción estratégicas para la gestión del recurso hídrico (Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010).

Esta investigación presenta un sistema novedoso pero simple que integra la información de las variables sociales e hidrológicas de la cuenca del río en un sistema en línea para el apoyo a la toma de decisiones y permite la comparación de escenarios en los que se priorizaron variables como la cantidad de agua disponible y asignación de la misma dentro del sistema hídrico. El concepto desarrollado hasta ahora representa el sistema de cuenca Coello en Colombia, y permite simular y compartir ideas. Se analizaron las características actuales de varios programas disponibles en el mercado. Pensando en un aporte significativo en esta área, se desarrolló una nueva biblioteca de scripts en Python, con un desarrollo flexible de escenarios. Este sistema se basa en la ecuación de continuidad aplicada al concepto cuenca y su interacción con usuarios del agua. Aparte de esto, el sistema se realizó en código abierto de modo que se puede representar fácilmente otra cuenca e incluso se pueden conectar otros sistemas de modelación hidrológica. Este documento también es una continuación de la investigación desarrollada en WEAP para la cuenca Coello realizada anteriormente por Meiline Siahaan (Siahaan, 2016).

CASO DE ESTUDIO

El rio Coello nace en el Nevado del Ruiz, ubicado en la cordillera central de los Andes en Colombia, está ubicado al suroeste de la ciudad de Bogotá, atraviesa el departamento del Tolima y desemboca en el rio Magdalena. Tiene un área de 1800 kilómetros cuadrados, comprendiendo provincias climáticas del tipo paramos, frio, templado y cálido.

La cuenca del rio Coello se divide en cinco subcuencas las cuales son: la cuenca del Río Toche, Río Coello, Río Combeina, Río Barmelon, Río Cocora y Quebrada Gallego.

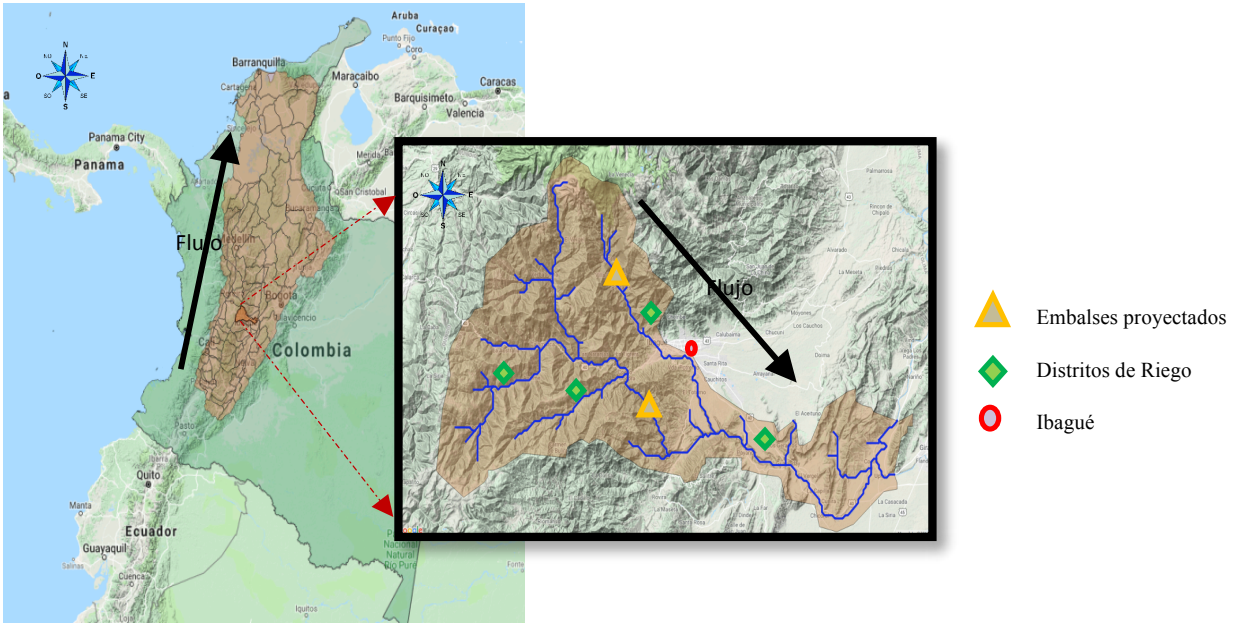


Figura 1.- Ubicación geográfica y características de demanda hídrica de la cuenca del rio Coello, Colombia.

Dentro de la cuenca del río Coello se encuentran ciudades importantes como Ibagué, capital del departamento del Tolima y ciudades de población intermedia como Flandes, Espinal, Cajamarca, Rovira, Coello y San Luis. Igualmente, tiene cuatro distritos de riego con un área de irrigación promedio de 4500 hectáreas y dos embalses proyectados con una capacidad instalada proyectada de 80 mega vatios por hora.

Adicionalmente, la cuenca del río Coello tiene un caudal promedio de 29.7 metros cúbicos por segundo y un rendimiento promedio del 16% por hectárea (IDEAM, 2014).

METODOLOGIA

Descripción del modelo HiWEB

Obtención de datos: Para el desarrollo del modelo se utilizaron dos archivos CVS proporcionados por el modelo WEAP de Meiline Siahaan (Siahaan, 2016). Uno de esos archivos CVS tenía series de tiempo diaria de caudal en metro cúbico por segundo y el segundo tenía un requerimiento mensual de agua para riego, ambos archivos pertenecen a la cuenca Coello en Colombia y se obtuvieron de las estaciones meteorológicas de IDEAM.

La poblacional actual de la ciudad de Ibagué se estima a partir de los últimos tres censos realizados por el Departamento Administrativo Nacional de Estadísticas DANE en la ciudad de Ibagué y se proyectó a partir de los métodos de crecimiento poblacional sugeridos en el Reglamento Técnico del Sector de Agua potable y Saneamiento Básico RAS.

Las capacidades de almacenamiento y generación hidroeléctrica de los embalses proyectados se tomaron de la ficha técnica de dichos proyectos.

Desarrollo del modelo: Para la representación aproximada de la asignación de agua en la cuenca del río Coello, el enfoque utilizado se basó en seis pasos: (1) Recolección de la información de los caudales disponibles y el esquema de relaciones de demandas hídricas en la cuenca (2) Simulación de la demanda de agua potable (3) Simulación de la demanda de agua para irrigación (4) Análisis de la cantidad de agua disponible versus la cantidad de agua requerida por tramo (5) Calculo del balance hídrico por tramo. El desarrollo de la modelación y su relación se muestra en la Figura 2.

A continuación, se describen las ecuaciones utilizadas para simular la demanda de agua potable y de irrigación:

$$D_j = Ru * Unidad \qquad [1]$$

Donde:

$j: Tipo\ de\ demanda\ (irrigacion\ o\ agua\ potable)$

$Ru = Tasa\ de\ uso\ del\ agua\ \left[\frac{m^3}{unidad\ de\ j}\right]$

$Unidad = Cantidad\ de\ unidades\ a\ satisfacer\ (habitantes\ o\ area\ de\ irigacion)$

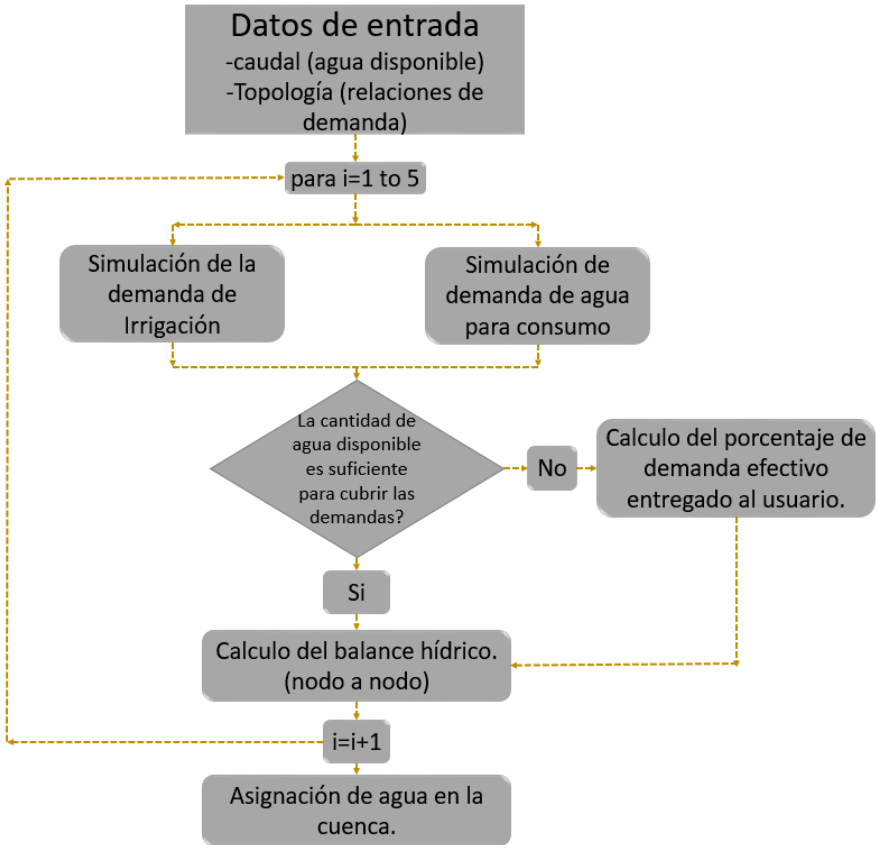


Figura 2.- Diagrama de flujo HiWEB.

Para saber la cantidad de agua que es realmente asignada en cada tramo y antes de calcular el balance hídrico en el mismo y en la cuenca, el modelo calcula el porcentaje efectivo de demanda suplida de la siguiente manera:

Luego de simular la demanda para agua potable e irrigación de la cuenca y a partir de los caudales disponibles en cada tramo, provenientes de la modelación hidrológica, el sistema de modelación (HiWEB) evalúa si la cantidad de agua disponible es sufriente para cubrir todas las demandas en el tramo, si no es suficiente, se calcula la demanda que realmente se podrá suplir en el tramo de forma proporcional a la cantidad de agua solicitada por cada punto de demanda, este proceso se describe a continuación:

$Paso\ 1: Verificar\ si\ los\ volumenes\ disponibles\ de\ agua\ son\ duficientes\ para\ suplir\ la\ demanda\ del\ tramo.$

$$Si\ V_{in}[i] < ReQ[i] \ \rightarrow \ UD[i] = ReQ[i] - V_{in}[i]$$
$$else\ UD[i] = 0 \qquad [2]$$

$Paso\ 2: Calcular\ la\ demanda\ no\ suplida$

$$UDj[i] = \frac{D_j[i]}{ReQ[i]} * UD[i] \qquad [3]$$

Paso 4: calcular la demanda suplida efectivamente.

$$SupplyReQj = Dj - UDj \qquad [5]$$

Donde:

$V_{in} = Caudal\ de\ entrada\ (m^3)$

$ReQ = \sum D_D + D_{Irr}$

$UD = Demanda\ no\ suplida$

$UDj = Demanda\ del\ sector\ j\ no\ suplida$

$SupplyReQj = Demanda\ efectivamente\ suplida\ del\ sector\ j$

Una vez HiWEB ha calculado la cantidad de agua que se podrá asignar a cada sector para cumplir total o parcialmente sus demandas hídricas mensuales, se realiza el balance hídrico en la cuenca.

Descripción del modelo WEAP

WEAP (Water evaluation and planning system) es una herramienta computacional para la planificación de la asignación del agua desarrollada por el Stockholm Environment Institute (SEI) para ayudar al planificador del agua mediante la simulación de diferentes escenarios de gestión de los recursos hídricos. Los escenarios se crean proponiendo diferentes demandas de agua como: hidrología, infraestructura, suministro y recursos, o calidad del agua. Esta herramienta implementa el balance de agua en una cuenca (Siahaan, 2016).

WEAP crea un esquema completo e integrado del uso de agua municipal, industrial y agrícola y las fuentes de suministro respectivas. El modelo es útil para identificar sistemáticamente a todos los usuarios y fuentes de suministro por cantidad y ubicación. Todos los suministros de agua superficial, suministros de agua subterránea y transvases entre cuencas pueden incluirse en el modelo (Johnson et al., 1995).

Comparaciones entre oferta y demanda: Estas se pueden realizan en cada sitio de demanda, como el tratamiento de agua o la planta de tratamiento de aguas residuales, o en un nivel agregado, como ciudad o país. La proyección de las demandas futuras pueden hacerse de varias maneras en teniendo en cuenta las estimaciones de suministros bajo condiciones de sequía u otras condiciones hidrológicas (Yates, Purkey, Sieber, Huber-Lee, & Galbraith, 2005).

Informes de balance de masas: El modelo puede mostrar un balance masivo de extracciones y usos en cualquier nodo del río o afluente, sitio de demanda, instalación de tratamiento de aguas residuales y fuente de suministro (Johnson et al., 1995).

La Figura 3 muestra el modelo de cuenca de Coello en WEAP, también muestra la interacción entre nodos, ríos y afluentes.

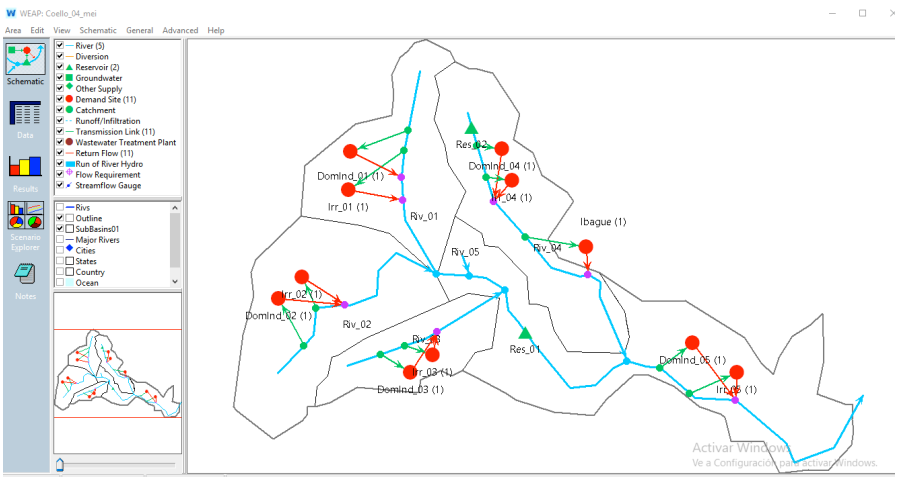


Figura 3.- Modelo de la cuenca Coello en WEAP.

Método de validación

El proceso de validación se realizó a través de la comparación de los volúmenes de agua disponibles en un período de tiempo simulado por cada modelo (WEAP y HiWEB). Esta comparación se verificó mediante el método del Error Cuadrático Medio (RMS). Por lo tanto, para la validación de la simulación, se seleccionó un escenario de referencia, este escenario de referencia no incluye restricciones de almacenamiento o cambio climático, y se modelo con los datos históricos de la cuenca Coello.

En la segunda parte de la simulación, se seleccionaron dos escenarios de cambio climático presenten en el modelo WEAP lo cuales se describen a continuación:

- Situación actual (Escenario de referencia 1980-2013): este escenario usa los datos históricos.
- Impacto del cambio climático y los cambios socio-económicos (Escenario Todos los cambios en 1981-2013): Este escenario se ha adaptado del escenario de referencia con varios cambios como se detalla a continuación:
    1. Aumento de la evapotranspiración de cultivos potenciales
    2. Aumentando la demanda de agua
    3. Cambiando el caudal de entrada usando la proyección más extrema.
    4. Incremento del factor multiplicador de la demanda doméstico e industrial.

Los datos de entrada utilizados para el modelo de Python se proporcionaron en archivos CVS, que contienen la siguiente información:

• Una serie diaria de caudales en metros cúbicos por segundo para el escenario de referencia.

• Una serie diaria de caudales en metros cúbicos por segundo para el escenario Todo cambio.

• Una serie mensual de la demanda de irrigación en metros cúbicos por segundo para los escenarios de referencia y el escenario Todo Cambia.

RESULTADOS.

El modelo desarrollado en HiWEB se comparó con el modelo WEAP en términos de wvolumen de agua disponible por debajo del punto de demanda final de la cuenca Coello. De manera similar, se compararon las demandas de oferta y no satisfechas para todas los tramos de ríos presentes y modelados dentro de los sistemas.

Como se muestra en la **Figura 4**, el comportamiento de los hidrogramas de salida, en el Escenario de Referencia, es similar, ambos tienen el pico en la misma época del año, por lo que esta simulando los eventos extremos de forma similar en ambos modelos. Adicionalmente, el error encontrado en el cálculo de los volumen disponibles por debajo de nodo final de demanda fue del 0.3%. De manera similar, ambos hidrogramas presentan un comportamiento bimodal durante el año, lo que muestra la semejanza en el comportamiento hídrico simulado en ambo modelos.

Al mismo tiempo, como puede ver en la **Figura 5**, en el escenario Todo cambia, el comportamiento de los hidrogramas también es similar, presentado para este escenario un único pico durante el año con un error de 0.4% en el cantidad de agua.

Igualmente, cuando se hizo la comparación para el tramo 2, una de los tributarios en la cuenca Coello se obtuvo, para el escenario de referencia y el escenario de cambio total, un error de 0.17% y 2% para el suministro de agua entregado y para la demanda hídrica no satisfecha del uso domestico y de irrigación se encontraron errores en el cálculo de 1% y 0.5% respectivamente.

De forma similar, ambos modelos representan los meses críticos en términos de disponibilidad de agua para suplir las demandas requeridas tanto en los tramos como en la cuenca en general, como se observa en la **Figura 6**, dichos meses para el escenario de referencia coinciden con los meses de Enero y Febrero, en los cuales se logra suplir para la demanda doméstica y de irrigación alrededor del 90% del requerimiento. Para el escenario todo cambia estos meses coinciden con Enero, Febrero y Marzo, en los cuales se logra suplir para la demanda de irrigación y domestica cerca del 45% en los dos primeros y cerca del 87% en el último mes crítico.

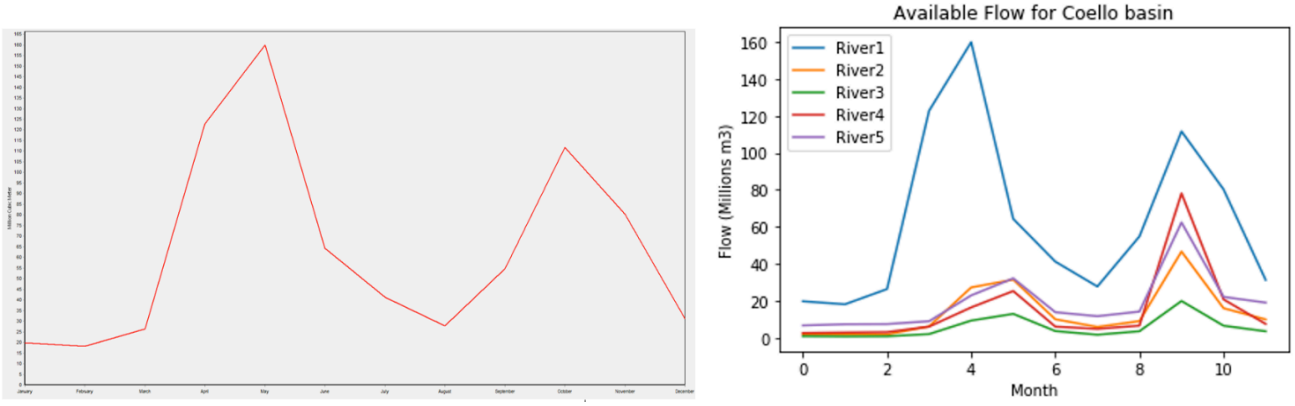


Figura 4.- Hidrogramas de salida. Escenario de Referencia. Modelo WEAP izquierda. Modelo HiWEB derecha.

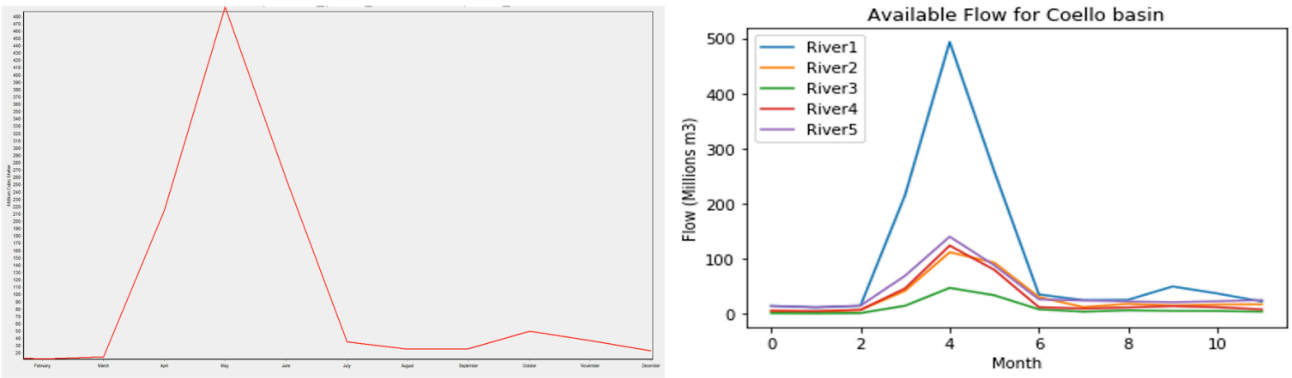


Figura 5.- Hidrogramas de salida. Escnario todo cambia. Modelo WEAP izquierda. Modelo HiWEB derecha.

	Month	HeadFlowR2	Domestic Demand	Irrigation Demand
0	Jan	12.588	4.717	9.196
1	Feb	9.677	4.261	6.131
2	Mar	12.053	4.717	2.682
3	Apr	44.064	4.565	0.000
4	May	114.100	4.717	0.000
5	Jun	96.941	4.565	1.916
6	Jul	36.158	4.717	3.449
7	Ago	19.820	4.717	5.365
8	Sep	22.291	4.565	1.916
9	Oct	18.481	4.717	1.150
10	Nov	20.995	4.565	1.916
11	Dic	24.373	4.717	4.981

	Supply delivered Domestic	Supply delivered Irrigation
0	4.268	8.320
1	3.968	5.709
2	4.717	2.682
3	4.565	0.000
4	4.717	0.000
5	4.565	1.916
6	4.717	3.449
7	4.717	5.365
8	4.565	1.916
9	4.717	1.150
10	4.565	1.916
11	4.717	4.981

	Month	HeadFlowR2	Domestic Demand	Irrigation Demand
0	Jan	5.812	1.577	12.765
1	Feb	5.212	1.475	8.510
2	Mar	4.768	1.577	3.723
3	Apr	6.765	1.526	0.000
4	May	27.882	1.577	0.000
5	Jun	33.929	1.526	2.659
6	Jul	14.008	1.577	4.787
7	Ago	11.758	1.577	7.446
8	Sep	11.508	1.526	2.659
9	Oct	48.399	1.577	1.596
10	Nov	18.481	1.526	2.659
11	Dic	15.428	1.577	6.914

	Supply delivered Domestic	Supply delivered Irrigation
0	0.639	5.173
1	0.770	4.442
2	1.418	3.349
3	1.526	0.000
4	1.577	0.000
5	1.526	2.659
6	1.577	4.787
7	1.577	7.446
8	1.526	2.659
9	1.577	1.596
10	1.526	2.659
11	1.577	6.914

Figura 6.- Volúmenes disponibles en el tramo 2. Demandas requeridas y entregadas de irrigación y domésticas. Escenario de referencia izquierda. Escenario todo cambio derecha.

CONCLUSIONES

El sistema de modelación HiWEB logró recrear los resultados obtenidos con el modelo WEAP de manera satisfactoria ya que los errores calculados están por debajo del 2%. Esto significa que el programa podría obtener un proceso similar de asignación de agua que WEAP simulando el mismo comportamiento de la demanda de agua, el suministro entregado, la demanda no satisfecha y sobre todo el comportamiento de los hidrogramas al final de cada rama y al final de la cuenca estudiada.

HiWEB no tiene la funcionalidad de ubicación georreferenciada, por lo tanto, el usuario debe ingresar los datos manualmente y verificar las ecuaciones de balance hídrico para cada tramo, lo que significa que el usuario debe revisar el orden en las interacciones de los usuarios dentro del sistema y luego simular la asignación de agua dentro de la cuenca de estudio.

Adicionalmente, dentro del proceso de distribución de agua en WEAP, se observó que una vez que este programa realiza el balance de masa, si en algún momento falta agua para suplir completamente la demanda, WEAP asume que la precipitación asignada en una subcuenca puede haberse generado en otro lugar de la misma por lo que todos los caudales ingresados se suman, omitiéndose las distribuciones espaciales de la precipitación y se hace una asignación general de agua dentro de la cuenca. Por lo que HiWEB está implementando dentro de su desarrollo, una mejora de la distribución espacial de la lluvia a través de modelos distribuidos de transformación agua-lluvia, así como también se están implementando mejoras en la simulación de la demanda de riego.

El *software* HiWEB actualmente permite calcular hidrogramas de salida en la cuenca estudiada, así como la demanda de aguas suplidas y no suplidas en cada tramo o en la cuenca completa. También es posible determinar los meses críticos de demanda y el comportamiento del flujo a través de la red. Adicionalmente, en su estado actual, el ingreso de los datos de entrada al HiWEB se realiza leyendo datos hidrológicos procesados en archivos CVS; no obstante, se está trabajando en la lectura automática de las variables hidrológicas, en la conexión con una base de datos y una interfaz online para los futuros usuarios en donde se puede ingresar, almacenar y manejar los datos hidrológicos y de demanda del sistema hídrico que se quiera estudiar.

REFERENCIAS.

Craven, J., Angarita, H., Corzo Perez, G. A., & Vasquez, D. (2017). Development and testing of a river basin management simulation game for integrated management of the Magdalena-Cauca river basin. *Environmental Modelling & Software*, *90*(January), 78–88. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.01.002

Figueroa, C., & Escobar, M. (2015). Modelación hidrológica del recurso hídrico en la subcuenca del Río Aipe en Colombia "Ríos del páramo al valle, por urbes y campiñas." *Sei*, (Figura 1), 1–4.

IDEAM. (2010). Estimación de la demanda del agua: Conceptaulización y dimensionamiento de la demanda hídrica sectorial. *Estudio Nacional Del Agua*, 169–228.

IDEAM. (2014). *Estudio Nacional del Agua*. *Estudio Nacional del Agua 2014*.

Johnson, W., Williams, Q., & Kirshen, P. (1995). WEAP: A Comprehensive and Integrated Model of Supply and Demand. *Georgia Water Resources Conference*, 291–293. Retrieved from http://smartech.gatech.edu/handle/1853/44000

Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, C. (2010). *Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico.* (M. D. A. V. Y. D. T. Colombia, Ed.) (1st ed.). Bogota D.C: Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, Colombia.

Siahaan, M. H. (2016). Development of a Web-based Water Allocation Model: Case Study of Coello Basin, Colombia, (April).

Yates, D., Purkey, D., Sieber, J., Huber-Lee, A., & Galbraith, H. (2005). WEAP21—A Demand-, Priority-, and Preference-Driven Water Planning Model. *Water International*, *30*(4), 501–512. https://doi.org/10.1080/02508060508691894

IAHR **AIIH**

XXVIII CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA
BUENOS AIRES, ARGENTINA, SEPTIEMBRE DE 2018

METODOLOGÍA PARA FORTALECER EL PROCESO DE FACTURACIÓN DE CONSUMOS EN ORGANISMOS OPERADORES DE AGUA POTABLE, ALCANTARILLADO Y SANEAMIENTO

López Zúñiga Arturo y Mariano Romero Carlos Eduardo
Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Paseo Cuauhnáhuac 8532, Col. Progreso, C.P. 62550, Jiutepec, Morelos, México. Teléfono: 01 777 329 36 00 Ext. 263.
alopez@tlaloc.imta.mx y cmariano@tlaloc.imta.mx

RESUMEN

Dentro de las actividades que desarrolla el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), se encuentra la ejecución de proyectos relacionados con la medición del agua en diferentes estructuras hidráulicas (presas, ríos, canales, tuberías, etcétera). Estos proyectos se realizan a través de convenios de colaboración con diferentes instituciones, o mediante proyectos internos, que son financiados con recursos propios. La finalidad de dichos proyectos estriba en mejorar la calidad de la medición en macro y micro medidores, con el objetivo de ser más eficientes durante la cuantificación de los volúmenes de agua e incidir en el incremento de la facturación de consumos, en las áreas comerciales de los Organismos Operadores. En México, en la mayoría de las instituciones destinadas a la administración del agua, se presentan altos índices de agua no contabilizada, lo que afecta la recaudación por concepto de pago del servicio. Ante tal situación, a través de este trabajo se propone una metodología encaminada a fortalecer el proceso de facturación consumos, y de esta manera hacer un uso racional del agua, para asegurar del vital líquido a la población actual y futura.

ABSTRACT

Among the activities developed by the Mexican Institute of Water Technology (IMTA), is the execution of projects related to the measurement of water in different hydraulic structures (dams, rivers, canals, pipes, etc.). These projects are carried out through collaboration agreements with different institutions, or through internal projects, which are financed with their own resources. The purpose of these projects is to improve the quality of the measurement in macro and micro meters, with the aim of being more efficient during the quantification of water volumes and to influence the increase in consumption billing, in the commercial areas of Operating Organizations. In Mexico, in most of the institutions dedicated to water management, there are high rates of unaccounted-for water, which affects the collection for the payment of the service. In view of this situation, through this work a methodology is proposed aimed at strengthening the consumption billing process, and in this way making a rational use of water, to ensure the vital liquid to the current and future population.

PALABRAS CLAVES: medición; eficiencia física y facturación

INTRODUCCIÓN

Actualmente en México, uno de los problemas más importantes que afectan el buen desempeño de Organismos Operadores de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento, o de las Comisiones Estatales de Agua, es la deficiente o nula aplicación de un proceso adecuado de facturación de consumos. Lo anterior trae como consecuencia que no se tenga un control adecuado del recurso hídrico. Aunado a lo anterior, se presentan deficiencias en la cuantificación de consumos, lo que afecta la eficiencia física del sistema. Otro punto importante tiene que ver con la disminución de la eficiencia comercial, lo cual se traduce en pérdidas económicas debidas al cobro por concepto de derechos de agua. El daño más importante es el que se hace al medio ambiente, ya que del total del agua que se extrae de las fuentes de abastecimiento, debido a un proceso deficiente de facturación, entre otras cosas, se desperdicia un porcentaje importante de agua.

Cabe mencionar, que para la correcta ejecución del proceso de facturación de consumos se deben considerar los siguientes factores: 1) Equipos de medición, 2) Proceso de toma de lectura y 3) Procesamiento de la información en oficina. Para el caso de los medidores, estos se deben de adquirir atendiendo a los requerimientos técnicos referentes a la operación de la infraestructura hidráulica y a las condiciones climatológicas del sitio donde se van a colocar, además se deben instalar de acuerdo a las recomendaciones establecidas en la normatividad aplicable (NOM-012-SCFI-1994) y, dependiendo de la calidad del agua, se les debe dar mantenimiento (limpieza al interior y exterior del medidor) por lo menos una vez al año. En cuanto al proceso de toma de lectura, el personal asignado a esta actividad, deberá ser capacitado para que registre el volumen de agua de manera correcta. Finalmente, el tratamiento de la información por parte del personal que se encuentra en oficina, tiene que ser el adecuado y deberá aplicar los criterios establecidos para estimar los consumos de agua no medidos.

En la mayoría de los Organismos Operadores de México, el proceso de facturación de consumos lo llevan a cabo dos departamentos: 1) Micro medición y 2) Facturación y cobranza. Estas áreas son las responsables de cuantificar el volumen consumido por los usuarios, emitir un recibo o una factura, y finalmente cobrar por dicho servicio a la población. Resulta indispensable que dichas áreas trabajen de manera conjunta, y haya una relación estrecha para que el proceso de facturación se lleve a cabo de manera adecuada.

La mejora continua en el proceso de facturación de consumos permitirá al ente administrador del agua aprovechar de mejor manera el recurso y hacer un uso racional del mismo. Lo anterior permitirá garantizar el consumo del agua para la población actual y futura, y fomentará la seguridad hídrica del país.

Con base en este trabajo, se presentan los mecanismos o procedimientos que se deben llevar a cabo para fortalecer el proceso de facturación de consumos en Organismos Operadores de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Dichos procedimientos se deben llevar a cabo de manera sistemática durante todo el proceso de facturación. Estos mecanismos están orientados en dos ejes principales: 1) Lo referente al equipo de medición y 2) La capacitación que se debe impartir a todo el personal inmerso en el proceso de facturación de consumos.

OBJETIVO DEL ESTUDIO

Implementar una metodología para fortalecer el proceso de facturación de consumos en empresas o instituciones encargadas de prestar los servicios de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Con base en la aplicación de dicho procedimiento, los Organismos Operadores

tendrán un mejor control del recurso hídrico y las eficiencias física, comercial y global incrementarán de manera significativa.

ANÁLISIS DE LA PROBLEMÁTICA RELACIONADA

En México, se pierde el 30 % del agua que se extrae de las fuentes de abastecimiento. Lo anterior trae como consecuencia pérdidas económicas al Organismo Operador. Además, desde el punto de vista ambiental, se desperdicia el vital líquido de manera sustancial. Algunos de los factores que inciden en estas pérdidas son los relacionados con los procesos de cuantificación y facturación de agua potable. Para reducir dichas pérdidas es necesario que los entes administradores del agua implementen una metodología que refuerce el proceso de facturación de consumos, con base en la normatividad vigente y en las recomendaciones establecidas en la literatura correspondiente. Mediante este trabajo se pretende proponer dicha metodología, que sirva de apoyo a las empresas que administran el agua, para fortalecer o alinear el proceso de facturación de consumos de agua potable.

METODOLOGÍA PROPUESTA

Como ya se comentó previamente, la parte fundamental de este trabajo consiste en la propuesta de una metodología que propicie el fortalecimiento del proceso de facturación de consumos en Organismos Operadores de Agua y Saneamiento y en cualquier empresa destinada a la administración del recurso hídrico. Para aplicar dicha metodología y tener resultados favorables, se deben de llevar a cabo las siguientes actividades:

1. Identificar que se tienen deficiencias en el proceso de facturación de consumos, para ello es necesario analizar los volúmenes extraídos en las fuentes de abastecimiento y compararlos con los volúmenes consumidos por los usuarios. En este punto es muy importante calcular las eficiencias física, comercial y global del sistema. Si la eficiencia física se encuentra por debajo del 70%, es un indicador contundente que establece que el proceso de facturación de consumos presenta una o varias deficiencias en una o algunas de sus etapas.

2. Partiendo que la eficiencia física tiene un valor inferior del 70%, lo que procede es revisar de manera detallada los equipos de medición, para ello es necesario seleccionar una muestra representativa del padrón de usuarios. Lo primero que se va a revisar es que el medidor que se encuentra instalado sea el adecuado.

3. Enseguida se revisará que el equipo de medición esté bien instalado, de acuerdo a las recomendaciones de la NOM-012-SCFI-1994. También es importante verificar que no haya fugas en la toma domiciliaria y que el medidor no haya sido alterado o manipulado, ya sea por el usuario o por otra persona, desde el punto de vista técnico, y que esté dentro de su vida útil, ver figura 1.

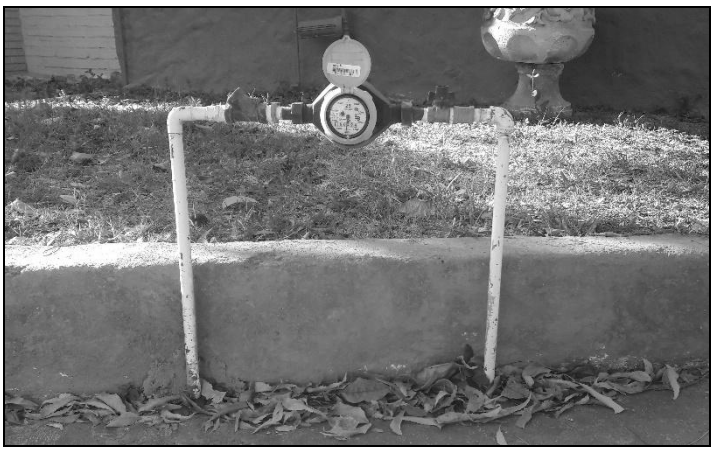


Figura 1.- Toma domiciliaria de tipo doméstico, se aprecia el medidor instalado.

4. Otro aspecto fundamental que tiene que ver con el equipo de medición consiste en examinar que haya sido configurado de manera correcta (para medidores electrónicos y ultrasónicos) y que se le haya dado mantenimiento de forma periódica (medidores mecánicos). Cabe mencionar que dicho mantenimiento consiste en llevar a cabo una limpieza al interior y exterior del medidor.

5. Revisar en campo y oficina la forma en que el personal involucrado en el proceso de facturación de consumos lleva a cabo sus actividades. Con base en lo anterior, detectar necesidades de capacitación, ver figuras 2 y 3.

Figura 2.- Observación de la instalación de una toma domiciliaria por personal del Organismo Operador.

Figura 3.- Observación del proceso de facturación de consumos en oficina, por personal del Organismo Operador.

6. Apoyándonos en el punto anterior, capacitar de manera continua al personal inmerso en las actividades de facturación de consumos, principalmente en temas de medición y normatividad aplicable, ver figura 4.

Figura 3.- Impartición de cursos de capacitación al personal de Organismos Operadores.

7. Para el personal de nuevo ingreso es muy importante que se le imparta un curso de inducción, para que esté en posibilidades de llevar a cabo sus funciones, de manera adecuada.

8. Resulta indispensable que el personal que participa en la facturación cubra el perfil que se requiere, para que esté en posibilidades que desempeñar sus funciones de manera correcta. Este punto resulta muy importante, ya que en muchas instituciones hay gente que no tiene el perfil para desarrollar las actividades que le son encomendadas, y por consecuencia, realizan incorrectamente sus funciones.

9. Desarrollar un manual o una guía en donde se estandaricen los criterios que se deben considerar durante la instalación de medidores, toma de lectura, verificación de medidores, validación de lecturas, proceso de facturación, etcétera.

10. Diseñar y construir un banco de pruebas, para verificar el correcto funcionamiento de los medidores fijos y portátiles. Este punto es muy importante, ya que normalmente hay usuarios que se inconforman con el volumen cuantificado por el medidor, y cuestionan su correcto funcionamiento.

11. Dar seguimiento oportuno a las anomalías y fugas reportadas por los lecturistas durante el recorrido de campo, así como, a los reportes emitidos por los usuarios, vía telefónica.

12. Resulta fundamental revisar, y en su caso actualizar, los criterios de validación que se aplican en los Organismos Operadores de Agua, Potable, Alcantarillado y Saneamiento, durante la estimación de consumos.

13. Establecer un sistema de multas a usuarios que dañen o alteren el correcto funcionamiento del medidor.

14. En caso de que el usuario no pague en tiempo y forma el recibo del agua, otorgarle una tolerancia máxima de dos meses para que pague, de lo contrario, limitarle el servicio.

RESULTADOS

Los resultados muestran la importantica de utilizar la metodología propuesta en este trabajo. Sin duda, mediante la aplicación de este procedimiento el Organismo Operador reducirán de manera importante las pérdidas físicas y comerciales que se presentan durante la facturación de consumos. Además, las eficiencias física, comercial y global incrementarán de manera significativa. Otra de las ventajas de esta metodología es que permite un incremento importante en la recaudación por cobro del servicio del agua. Este recurso económico se puede aprovechar para darle mantenimiento preventivo y correctivo a la infraestructura hidráulica, o bien, para ampliar la cobertura de agua potable, drenaje y saneamiento.

CONCLUSIONES

Resulta fundamental alinear los procesos de facturación de consumos medidos y estimados a través de la metodología que aquí se presenta, ya que se apegue a la normatividad vigente y a la literatura correspondiente. Con esto, las pérdidas físicas y comerciales que se presentan en el Organismo Operador reducirán de manera importante. Lo anterior traerá como consecuencia que se aproveche de manera racional el recurso hídrico y prevalezca el mismo, en beneficio de la población actual y futura.

Mediante esta metodología se realiza un diagnóstico general de todo el proceso de facturación de consumos que se lleva a cabo en el ente administrador del agua, desde el equipo de medición hasta el total del personal involucrado en el proceso. Otro punto importante que se tiene que considerar, y que de alguna manera ya se había comentado, se presenta durante la realización de las especificaciones técnicas que deben cubrir los medidores que se van a adquirir, y en donde se deberá tomar en cuenta el gasto y la presión en la red de distribución de agua potable, así como, las condiciones climatológicas de la zona en donde se instalarán los equipos de medición, entre otras cosas. Con base en dicho diagnóstico se definen acciones de mejora en cada una de las etapas, las cuales se presentan de manera explícita en esta propuesta, con la intención de reforzar el proceso de facturación.

REFERENCIAS

Comisión Nacional del Agua (2015). "Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento". Edición 2015.

Comisión Nacional del Agua (2014). *"Atlas del Agua en México 2014". 139 páginas.*

Comisión Nacional del Agua (2010-2015). Situación del subsector agua potable, alcantarillado y saneamiento, ediciones 2010, 2011, 2012, 2013, 2014 y 2015.

Comisión Nacional del Agua (2008). Metodología de evaluación socioeconómica para proyectos de agua potable, alcantarillado, saneamiento y protección a centros de población.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2017). Datos de cobertura de agua potable y alcantarillado en las entidades federativas de la República Mexicana.

Informe 2016: "Determinación de los Niveles de Precisión de la Macro y Micro Medición Empleada en SEAPAL y Definición de Acciones para el Incremento de los Valores de la Eficiencia Física del Sistema".

Informe 2017: "Alineación en los procesos de facturación de consumos (medidos y estimados) para la reducción de pérdidas aparentes".

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (1988). Manual de Diseño de Estructuras de Aforo. 107 páginas.

Organización Meteorológica Mundial (1994). "Guía de Prácticas Hidrológicas". 781 páginas.

COMISIÓN ORGANIZADORA

INSTITUTO NACIONAL DEL AGUA

Au. Ezeiza Cañuelas, Tramo J. Newbery Km 1,620 - Ezeiza, Buenos Aires, Argentina
(+54 11) 4480-9162 - hidraulica2018@gmail.com / www.ina.gob.ar

SPONSORS

ISBN 978-987-45194-7-4