

MODELAMIENTO ESTOCÁSTICO EN LA DETERMINACIÓN DE LA OFERTA HÍDRICA DEL RÍO SOURCE MATELAS (HAITÍ): Aplicación al predimensionamiento de un embalse

LÍA PATRICIA GIRALDO¹

DIANA PATRICIA PÉREZ²

HERNÁN ALONSO MORENO³

DANIEL RUIZ⁴

RESUMEN

Source Matelas es un poblado del departamento del Oeste en la República de Haití, con escasos recursos económicos y con un bajo nivel de vida, fundamentalmente debido a la escasez casi total del recurso hídrico. En el presente trabajo se realiza una primera aproximación al estudio de prefactibilidad de construcción de un embalse con cuantificación de la oferta hídrica superficial en la región, por medio de metodologías hidrológicas para la estimación de la información desconocida. Se calculan las componentes del balance hídrico de largo plazo y se estiman los caudales diarios que alimentarán el modelo de simulación del embalse. El caudal medio estimado del río Source Matelas en el punto escogido para la construcción de la presa es de 26 L/s. Con base en dicha simulación de la operación del embalse, se estima el volumen necesario para compensar diferentes fracciones del caudal medio y se determina que la demanda de agua poblacional es abastecida totalmente si se construye un embalse de 212.000 m³ de capacidad.

PALABRAS CLAVE: Source Matelas; oferta hídrica; hidrología; desagregación; balance hídrico; embalses.

¹ Ingeniera Civil, Escuela de Ingeniería de Antioquia. cvligir@gmail.com

² Ingeniera Civil, Escuela de Ingeniería de Antioquia. dpperez@gmail.com

³ Ingeniero Civil, Universidad Nacional de Colombia. Magíster en Ingeniería de Recursos Hidráulicos. Profesor Escuela de Ingeniería de Antioquia, Grupo de Investigación Gabis –Gestión del Ambiente para el Bienestar Social–. pfhemo@eia.edu.co

⁴ Ingeniero Civil, Universidad Nacional de Colombia. Magíster en Ingeniería de Recursos Hidráulicos. Profesor Escuela de Ingeniería de Antioquia, Grupo de Investigación Gabis –Gestión del Ambiente para el Bienestar Social–. pfcarlos@eia.edu.co

ABSTRACT

Source Matelas, located in the West State, Republic of Haiti, is a town with scarce economical resources and low quality of life, mainly because of the absence almost total of water. In this work we give a first approximation to a water reservoir pre-feasibility study, related to water supply quantification of the region, by means of hydrological methods to estimate unknown information. Long term components of the hydrological balance are calculated and daily mean yield that serves the model of reservoir simulation is estimated. The mean runoff calculated for the Source Matelas River is 0.026 m³/s. Based on reservoir modeling, volume needed to supply different percentages of the mean runoff is calculated. Therefore, it can be seen that population water demand will be supplied totally if a reservoir of 212000 m³ volume is constructed.

KEY WORDS: Source Matelas; water supply; hydrology; disaggregation; water balance; reservoirs.

1. INTRODUCCIÓN

Source Matelas, Haití, es una comunidad de 6.000 habitantes con graves problemas de salubridad, en su mayor parte determinados por la escasez de agua; por tanto, la vida de sus habitantes gira en torno a la preocupación de la búsqueda y preservación de ella.

El programa de Ingeniería Civil de la Escuela de Ingeniería de Antioquia (EIA), Colombia, en conjunto con la empresa Cimenterie Nationale (CINA), ha desarrollado un trabajo de investigación aplicada al desarrollo social de esta zona, en términos de un estudio de modelamiento en hidrología estocástica con énfasis en información escasa, orientado hacia la factibilidad de construcción de un embalse que ayude a satisfacer las necesidades hídricas de esa población y a controlar inundaciones en la zona.

2. DATOS Y METODOLOGÍA

La figura 1 ilustra la ubicación de la comunidad de Source Matelas en la Novena Sección de la Comuna de Cabaret, del departamento del Oeste de Haití, a 26 km de Puerto Príncipe. Sus coordenadas son: 18°43' N y 72° 22' W.

Debido a que la información cartográfica e hidrológica de la región es escasa, es necesario



Figura 1. Ubicación de Source Matelas, Haití

estimar la oferta hídrica por medio de información de zonas cercanas, imágenes satelitales, estudios técnicos y modelos que permiten obtener, a partir de dicha información, datos no disponibles en la región. A continuación se hará un breve repaso de la información recolectada para la realización de esta investigación.

Se dispone de un levantamiento topográfico que cubre un pequeño porcentaje de la cuenca que se analiza. Por la limitación anterior y para efectos del cálculo de la morfometría de la cuenca de drenaje, se utilizó un modelo de elevación digital de una imagen satelital de la National Aeronautics and Space Administration (NASA) con resolución de 90 m de píxel, la cual se procesó en el programa HydroSig Java 3.0 Beta, creado por la Universidad Nacional de Colombia. Posteriormente, se realizó la corrección digital automática de barreras y sumideros.



También se cuenta con información de seis perfiles del suelo dentro de la divisoria de la cuenca del río Source Matelas, los cuales son utilizados para calibrar los valores del suelo del modelo de tanques que se explicará más adelante.

Para estimar la precipitación media multianual del lugar de interés se analizaron imágenes del proyecto Reanalysis del Gobierno de los Estados Unidos (NOAA-CIRES, 2005), en las que se indica que este valor es de 1.734 mm/año para el período comprendido entre 1948 y 2006. Se tienen, como información pluviométrica de la zona, los registros tomados por el Projet Social CINA, que funcionó desde abril de 2004 hasta comienzos del 2005, cuando el pluviómetro fue reemplazado por uno nuevo, que ha registrado desde enero de 2005 hasta la fecha. La precipitación media anual que se registra es de 486 mm en el 2004 y 478 mm en el 2005.

Se cuenta además con un histograma de precipitación de la comuna de Cabaret, ubicada a 5 km al Noroeste de Source Matelas, que proviene de los datos de una estación pluviométrica llamada Duvallierville situada a 20 msnm y que funcionó de 1925 a 1934; luego se reactivó entre 1938 y 1957, y su último período de uso fue de 1960 a 1968, para obtener un período total de funcionamiento de 34 años. La precipitación media multianual es de 1.005 mm.

Con el fin de obtener la mayor cantidad de información posible y poder tomar decisiones frente a las discrepancias observadas, se consultaron también datos de precipitación de Puerto Príncipe, que se obtuvieron a partir de los registros mensuales del aeropuerto de la capital para el período 1889-1970. Se obtiene una precipitación media multianual de 1.301 mm.

Con el objeto de determinar la fase del ciclo anual de la precipitación en Source Matelas y considerando que la fase del ciclo anual de Puerto Príncipe se conserva para la región de estudio por similitud hidrológica (latitud, altitud, temperatura, vegetación, etc.) se encontró la fase en Cabaret, a

partir de la aplicación de los porcentajes mensuales de la lluvia total anual promedio multianual de Puerto Príncipe a la precipitación media anual de Cabaret y del Reanalysis, para generar escenarios positivos y negativos de precipitación (considerando las desviaciones estándar por encima y por debajo de la media).

La evapotranspiración potencial (ETP) se estimó por medio de la ecuación de Turc modificado y a partir de ésta se estimó la evapotranspiración real (ETR) con la ecuación de Budyko. Las variables requeridas para estimar la ETP de acuerdo con estos métodos son temperatura y radiación solar, obtenidas de las bases de datos del aeropuerto de Puerto Príncipe y del proyecto GEWEX y LANGLEY de la NASA. La temperatura y la radiación media anual son 28,5 °C y 600 cal/cm²/día respectivamente.

El modelamiento estocástico entra en este punto, pues los caudales medios se estimaron a partir de un modelo de balance hidrológico agregado utilizando una metodología de tanques (Vélez, 2001; Makhlof y Michel, 1994). Este modelo del balance hidrológico agregado simula el sistema de la cuenca por medio de unos tanques interconectados, en los cuales se representan los procesos determinantes de la producción de la escorrentía: interceptación, detención, infiltración, evapotranspiración, recarga del acuífero, escorrentía superficial y subsuperficial, retorno del flujo base y flujo en los canales de la red de drenaje. En este caso, se utiliza el modelo de tanques para generar una serie de caudales medios diarios. En la figura 2 puede observarse un esquema de este modelo.

En cada intervalo de tiempo, la precipitación X_1 se distribuye a los distintos almacenamientos de forma que descender depende de variables como la cantidad de agua disponible, el estado del almacenamiento del tanque y de la capacidad del conducto distribuidor aguas abajo, lo cual está regulado por la conductividad hidráulica en el subsuelo. En cada uno de estos tanques hay una contribución a la escorrentía (Y_i), la cual depende del volumen

almacenado en cada uno de ellos (H_i). La suma de estas contribuciones es el caudal total en la cuenca para cada intervalo de tiempo.

- Tanque 1: corresponde al almacenamiento capilar en el suelo. Es el agua que transita por la cuenca y sólo sale de ella por evaporación (agua de charcos o retenida por fuerzas capilares); por esta razón no contribuye a la escorrentía. Este tanque tiene una capacidad máxima que depende de la capacidad de almacenamiento de agua útil –la cual se relaciona con la cantidad de agua que hay que agregar a una columna de suelo muy seco para alcanzar el mayor almacenamiento capilar– y de la capacidad de la cobertura vegetal para almacenar agua. El agua que se evapora depende de la cantidad de agua almacenada y de la evaporación real.
- Tanque 2: representa el almacenamiento del flujo superficial. La cantidad de agua que entra a este almacenamiento es la escorrentía directa, la cual depende del excedente del almacenamiento capilar y del agua infiltrada, que es función de la conductividad hidráulica de la capa superior del suelo.
- Tanque 3: representa el agua almacenada en la capa superior del suelo mientras fluye lentamente hacia la red de drenaje. Parte del agua infiltrada puede percolar o seguir hacia la zona inferior del suelo, y la otra parte alimenta este tanque de almacenamiento para luego convertirse en flujo subsuperficial. La percolación depende de la conductividad hidráulica en la capa inferior del suelo (subsuelo) en condiciones de saturación.
- Tanque 4: representa el almacenamiento subterráneo. La cantidad de agua que ingresa por percolación puede dirigirse hacia las pérdidas subterráneas y otra parte puede derivarse hacia el almacenamiento subterráneo como recarga del acuífero que, luego de cierto tiempo de residencia, aporta agua al flujo base del río en los períodos de estío.

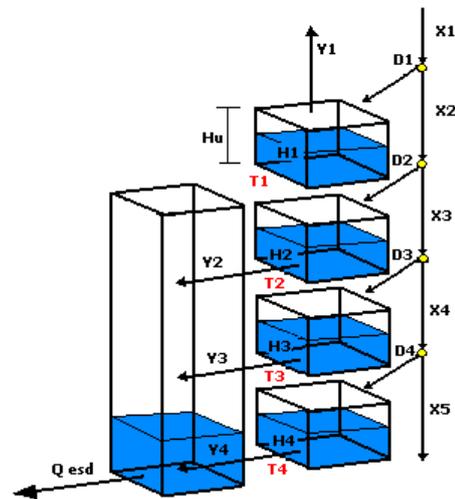


Figura 2. Esquema del modelo de tanques

Con el fin de calibrar el modelo de tanques, se analizó cada una de las variables estimando un rango de variación de acuerdo con las condiciones del suelo y del entorno, análisis que se basó en un estudio del suelo de la parte media de la cuenca del Source Matelas (Giraldo y Pérez, 2006). Con base en estos rangos se procedió a realizar un análisis de sensibilidad para determinar las variables más determinantes, estudiarlas más a fondo y poder así asignarles valores más confiables. Los criterios para la estimación del rango de variación para cada una de las variables se describen a continuación.

Almacenamiento capilar: depende de la vegetación, del agua que se queda estancada en charcos y de la capacidad de retención del suelo debido a fuerzas capilares. De acuerdo con el informe de suelos, el suelo superficial es arcilloso en un espesor aproximado de 10 a 12 cm. Estos suelos presentan un tamaño de grano fino, lo que genera unos vacíos muy pequeños y, por ende, sus fuerzas capilares son altas. Se determinó un rango de variación de este criterio entre 30 y 100 mm.

Conductividad capa superior: aunque el suelo de la capa superior es arcilloso y, por ello, tiene una conductividad del orden de $1 \cdot 10^{-3}$ mm/día, se considera una mayor magnitud, ya que se tiene en



cuenta la permeabilidad secundaria del suelo mismo, la cual se ve afectada por la erosión y por la presencia de carbonatos. Se determinó un rango de variación entre 3 y 10 mm/día.

Conductividad de capa inferior: aunque se encuentran estratos arcillosos, van acompañados de rocas, y al acercarse a la roca se encuentran conglomerados calcáreos, lo que facilita la infiltración. El rango de variación por este concepto es de 2 a 5 mm/día.

Pérdidas subterráneas: un análisis de sensibilidad del modelo demostró que los cambios en los valores de esta tasa no afectaban de manera sustancial los resultados del modelo, por lo que se supuso un valor insignificante para el modelamiento.

Tiempo medio de residencia del flujo superficial: el mínimo valor que tolera el modelo es de un día. Debido a la alta evaporación que se presenta en la zona se supuso este umbral.

Tiempo medio de residencia del flujo subsuperficial: el flujo en este estrato no se ve tan afectado por la evaporación y el umbral aumenta.

Tiempo medio de residencia del flujo base: luego de un aguacero, el flujo que logra penetrarse al suelo permanece en éste por un período de 5 a 50 días aproximadamente, el cual es en general el tiempo que tarda el agua en llegar a los acuíferos.

Para calcular los caudales por este método es necesario ingresar precipitación diaria, y dado que la escala de los datos de precipitación es mensual, es necesario aplicar un modelo de desagregación de la lluvia a la escala diaria.

El modelo aplicado es el de desagregación en cascada aleatoria (Olsson, 1998), que se apoya en el principio de transferencia de la masa de una estructura a gran escala a estructuras sucesivamente menores con conservación de la masa. El modelo emplea las potencias de 2 para el “cascado” o ramificación desde un nivel superior hasta uno inferior. En la figura 3 se muestra el esquema de cascada para representar las series de tiempo de los volúmenes de lluvia a resoluciones temporales sucesivamente dobladas.

En un nivel de cascada, un intervalo de tiempo es llamado cuadro, el cual tiene una lluvia asociada, que si es cero, será un intervalo seco. Pero si ésta es mayor que cero, ocurre la posibilidad de que se convierta en otros dos cuadros húmedos con un porcentaje de la lluvia original, de acuerdo con dos pesos multiplicativos w_1 y w_2 , los cuales pueden tomar valores: (1/0); (0/1) o (w_1/w_2) ; con $w_1 + w_2 = 1$.

Los pesos de desagregación para cada mes en los diferentes niveles se obtuvieron a partir de los registros de lluvia diaria del pluviómetro de CINA en el año 2005. De esta manera, se supuso que la distribución

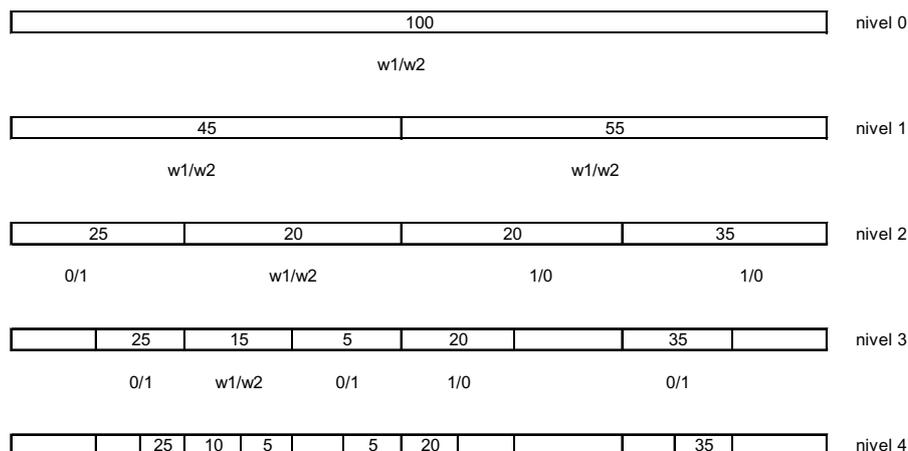


Figura 3. Esquema del modelo de desagregación de la precipitación en cascada

de la lluvia diaria de toda la serie de tiempo de trabajo se comporta de acuerdo con lo observado en Source Matelas en el año 2005. Sin embargo, para los meses de noviembre y diciembre, en los que en el 2005 la precipitación registrada fue cero, se tomó como base la precipitación registrada para el mes correspondiente en el año 2004. Para el caso de marzo, en el que la precipitación registrada en el 2005 fue también cero y para el cual no se tenía registro del año 2004, se supuso que los pesos multiplicativos eran iguales a los de febrero, que es un mes cercano y con precipitación baja. Como este modelo supone que los meses son de 32 días y realmente están variando entre 28, 30 y 31 días, se supuso que la precipitación para estos días faltantes era de cero. De esta forma no se afectan la distribución ni los totales de lluvia, dado que los pesos en estos días son iguales a cero, y, por tanto, pueden eliminarse del modelo final al aplicar la desagregación. El modelo de desagregación propuesto como una variación del modelo original de Olsson conserva el ciclo anual de la precipitación y, por lo menos, el primer momento de la distribución de probabilidades de la serie de precipitaciones diarias.

Finalmente, para estimar el volumen útil que se requiere para satisfacer la demanda hídrica doméstica de la población (4,79 L/s), calculada por Giraldo y Pérez (2006), se utilizó el método de algoritmo del pico secuente (Aparicio, 2001). El algoritmo se alimentó con registros diarios de caudales obtenidos por el método de los tanques entre los años 1947 y 1973. Este método se realizó con el objetivo de tener una curva de regulación del embalse (volumen útil contra demanda), variando la demanda como un porcentaje del caudal medio del río. Con la ayuda del levantamiento topográfico se determinaron el área superficial y la altura del embalse para cada volumen y se construyó además una curva de altura del agua contra volumen.

Respecto a las pérdidas hidrológicas sobre el espejo de agua, se trabajó con el supuesto de que la infiltración es mucho menor que la evaporación, y ésta se estimó como una demanda adicional a la demanda hídrica de la población.

3. RESULTADOS

3.1 Extracción de cuenca hidrográfica del río Source Matelas

La figura 4 ilustra el modelo de elevación digital de 90 m de píxel junto con la red de drenaje del río Source Matelas y la divisoria de aguas de la cuenca hasta el punto donde es factible construir una presa. Este modelo fue construido para esta investigación. La tabla 1 resume algunas de las características morfométricas de la cuenca del río en estudio.

3.2 Estimación de la precipitación de la cuenca

Los registros históricos para la precipitación total anual de la estación pluviométrica de Cabaret muestran un escenario negativo de lluvias con 453 mm/año; este valor se acerca a las precipitaciones registradas por el pluviómetro de CINA de 486 mm en el 2004 y 478 mm en el 2005. Según el consenso mundial, los años 2004 y 2005 tuvieron un fenómeno de El Niño, el cual tiene un impacto de reducción de las lluvias y aumento de las temperaturas medias en la república de Haití (+0,5 °C) sobre todo en el invierno del hemisferio norte (Instituto Meteorológico

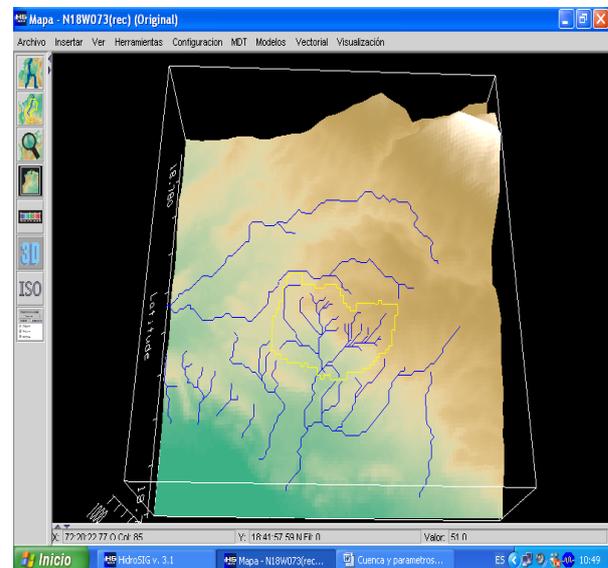


Figura 4. Modelo de elevación digital y red de drenaje del río Source Matelas



de los Países Bajos, 2006). Por esta razón, se supone que la precipitación media anual que se presenta en la comunidad de Source Matelas alcanza 1.005 mm, con un escenario positivo (La Niña) de 1.560 mm/año y otro negativo (El Niño) de 453 mm/año.

Tabla 1. Datos morfométricos de la cuenca del río Source Matelas

PARÁMETRO	VALOR
Área de la cuenca (km ²)	5,82
Perímetro (km)	6,31
Longitud del cauce principal (km)	3,43
Cota máxima en la cuenca [msnm]	456,0
Cota en la salida [msnm]	73,0
Pendiente media dela cuenca [%]	16,08

Dado que no se tienen registros de precipitación de varios años de escala mensual o diaria en Source Matelas, que son necesarios para realizar los cálculos de caudales medios mensuales, se tomaron los registros mensuales que se tienen de Puerto Príncipe para el período comprendido entre 1883 y 1973 y se multiplicaron por la relación entre la precipitación media multianual de Cabaret (1.005 mm) y la precipitación media multianual de Puerto Príncipe (1.301mm), de forma que las precipitaciones resultantes sean congruentes con la lluvia media anual estimada del sitio de interés. La figura 5 ilustra el resultado final para el ciclo anual de precipitación para cada uno de estos escenarios en Source Matelas.

En la figura 6 se presentan los registros de precipitación de escala mensual para Source Matelas

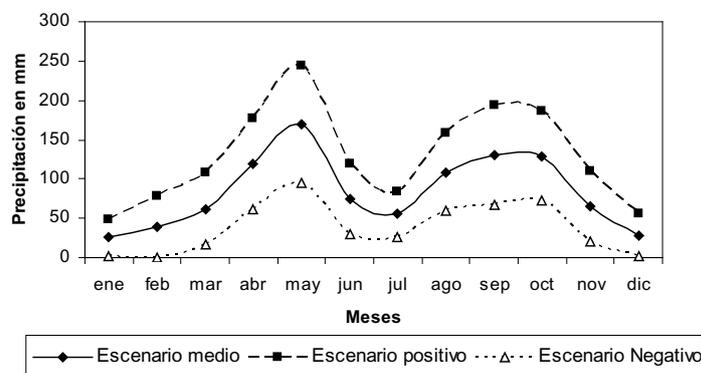


Figura 5. Ciclo anual de precipitación en Source Matelas a partir de la fase presentada en Puerto Príncipe. Escenarios positivo, medio y negativo para el aprovechamiento de la lluvia

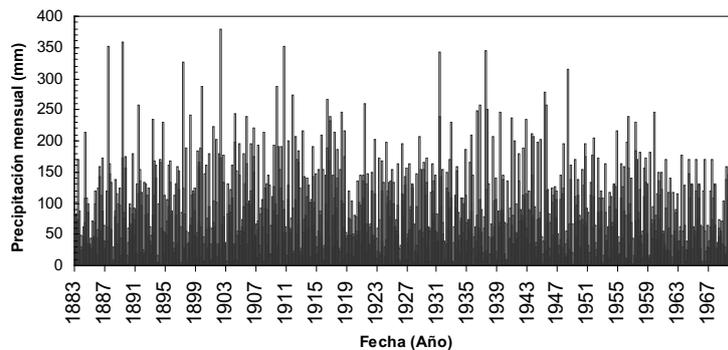


Figura 6. Serie de precipitación mensual generada para Source Matelas a partir del factor de escalamiento desde los valores de lluvia de Puerto Príncipe. Período 1883-1969

obtenidos a partir del factor de escalamiento desde los valores de lluvia de Puerto Príncipe.

3.3 Estimación de la evapotranspiración media sobre la cuenca

La figura 7 muestra los valores mensuales de evapotranspiración potencial mensual estimada mediante el método de Turc modificado (Vélez *et al.*, 2000).

La ETP total anual para Source Matelas es de 2.172 mm. Mediante la utilización de la ecuación de Budyko, se estima una evapotranspiración real ETR = 863 mm.

3.4 Estimación de caudales medios diarios

Del análisis de sensibilidad realizado al modelo de tanques se observó que las variables con mayor influencia sobre la variación de los caudales medios son el almacenamiento capilar y la conductividad de la capa superior. Los valores de cada uno de los indicadores se asignaron de una manera congruente con la dinámica del modelo y las condiciones físicas. En las tablas 2, 3 y 4 se observan los indicadores resultantes de la calibración del modelo a partir del análisis de sensibilidad.

Tabla 2. Indicadores del modelo de tanques para la cuenca del río Source Matelas

Almacenamiento capilar (mm)	100
Conductividad capa superior (mm/día)	3
Conductividad capa inferior (mm/día)	2
Pérdidas subterráneas (mm)	0
Tiempo medio de residencia flujo superficial (días)	1
Tiempo medio de residencia flujo subsuperficial (días)	3
Tiempo medio de residencia flujo base (días)	10

Tabla 3. Condiciones iniciales del modelo de tanques en mm

Almacenamiento capilar	T1	30
Almacenamiento de agua superficial	T2	1
Almacenamiento gravitacional superior	T3	2
Almacenamiento gravitacional inferior (acuífero)	T4	50

Tabla 4. Otros indicadores del modelo

Exponente de infiltración	2
Exponente de evaporación	0,7
Radiación global incidente promedia (cal/cm ²)/día	600

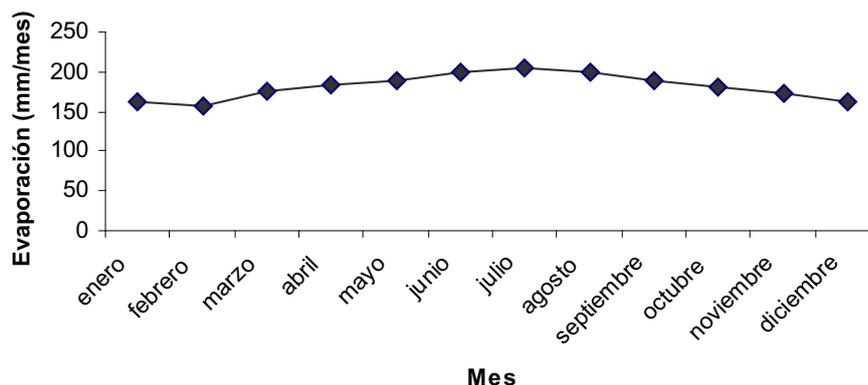


Figura 7. Evapotranspiración potencial mensual hallada por el método de Turc Modificado



En las figuras 8 y 9 se presentan las precipitaciones diarias generadas por el modelo de desagregación en cascada y los caudales medios diarios obtenidos por el modelo de los tanques para el modelo hidrológico agregado. El caudal medio estimado por este método para el río Source Matelas alcanza 26 L/s.

3.5 Predimensionamiento del embalse

Los resultados del predimensionamiento del embalse se muestran en las figuras 10, 11 y 12. Al considerar una evaporación sobre el espejo de agua de 5,8 mm /día, la pérdida de volumen alcanza 360 m³/d, que equivale a una demanda adicional de 4,17 L/s. Según esto, la demanda total es de 8,96 L/s, para la cual es necesario un volumen útil de almacenamiento de 212.000 m³, con una superficie de inundación de unos 65.600 m² que corresponden a una altura de presa de 14 m.

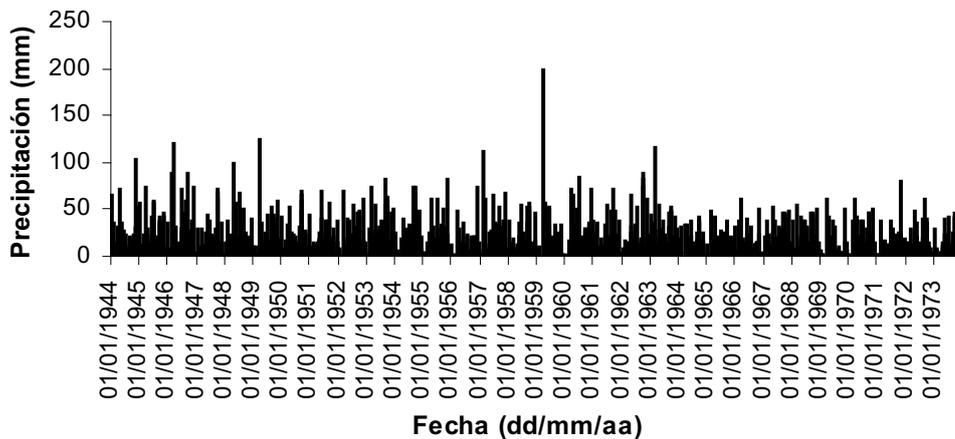


Figura 8. Precipitación diaria obtenida con el modelo de desagregación para los años 1944-1973

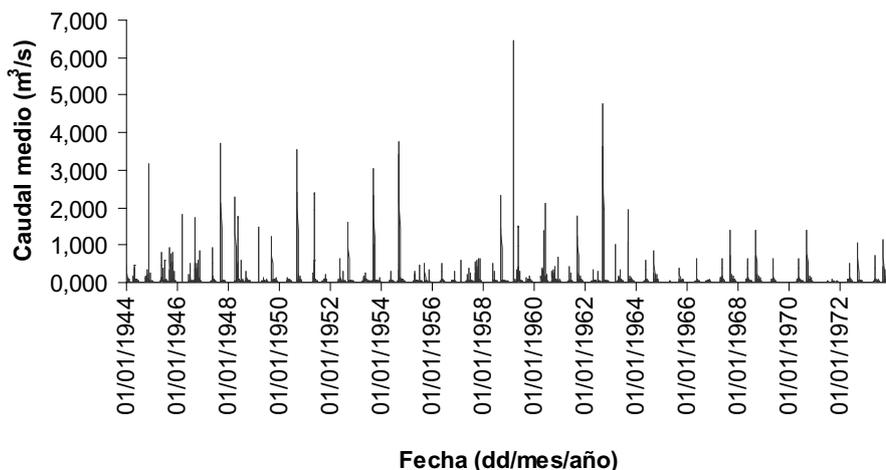


Figura 9. Caudales medios diarios generados por el modelo de tanques (1947-1973)

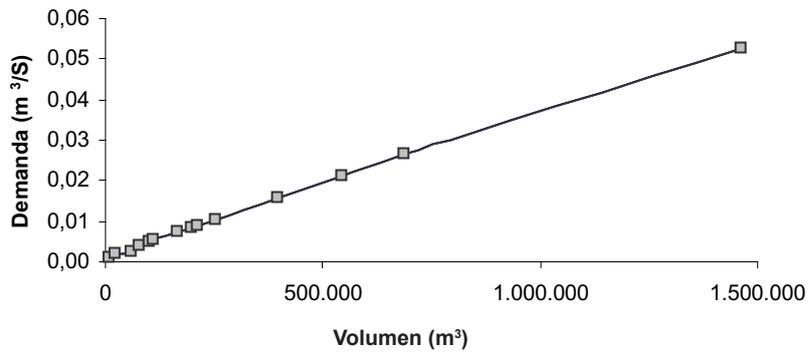


Figura 10. Curva de regulación del embalse. Volumen del embalse contra demanda hídrica

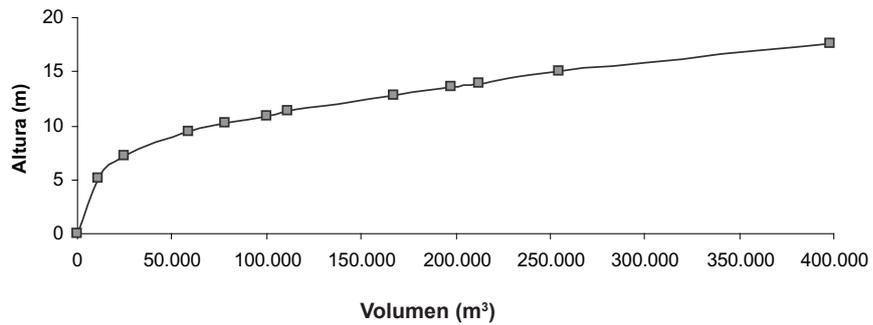


Figura 11. Curva de volumen contra altura del embalse

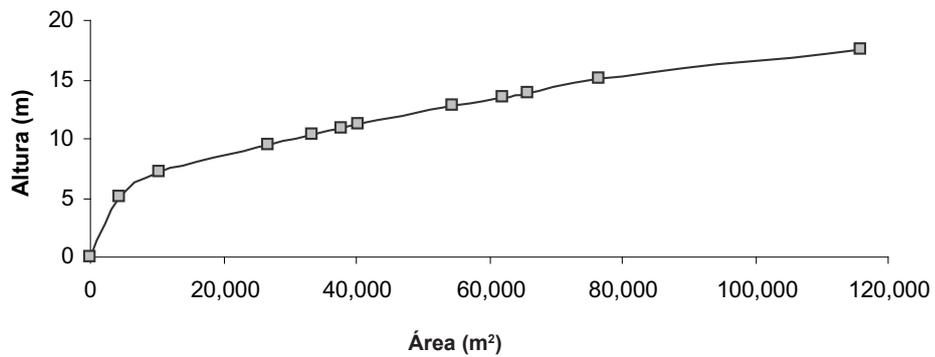


Figura 12. Curva de área inundada contra altura del embalse



4 CONCLUSIONES

Se determinó, a partir de información hidrológica escasa, la oferta hídrica del río Source Matelas en un punto escogido para el predimensionamiento de un embalse, aguas arriba del poblado de Source Matelas al occidente de Puerto Príncipe en Haití. Dicha oferta hídrica corresponde a un caudal medio diario de 26 L/s.

La precipitación fue estimada usando reconstrucción de información a partir de un pluviómetro instalado en Source Matelas y la fase de la lluvia del pluviógrafo de Puerto Príncipe. Un modelo de desagregación temporal en cascada aleatoria fue utilizado para generar los datos de lluvia diaria con los que se alimenta el modelo de tanques de generación de caudales. La evapotranspiración fue estimada a partir de los datos de temperatura media y radiación solar sobre Source Matelas.

Mediante el algoritmo del pico secuente se simula el comportamiento del embalse ante diferentes demandas, entendidas como porcentajes del caudal medio del río, y se construye la curva de regulación de caudales. Para satisfacer la demanda hídrica doméstica de la población de 4,79 L/s, el embalse requiere un volumen útil de almacenamiento de 212.000 m³, con una superficie de inundación de 65.600 m² que equivalen, según la topografía de la zona, a una altura de la presa de unos 14 m.

BIBLIOGRAFÍA

- APARICIO, Francisco. (2001). Fundamentos de hidrología de superficie. 1ª ed. México D. F. Limusa, 303 p.
- INTERNACIONAL STATION METEOROLOGICAL CLIMATE SUMMARY V 4.0. Total precipitation vs. year-month. Port au Prince AP. (CD de datos).
- GIRALDO, Lía y PÉREZ, Diana. Determinación de la oferta y la demanda hídrica de la región de la comunidad de Source Matelas (Haití), para el estudio de prefactibilidad de construcción de una presa (2006). Trabajo de grado. Ingeniería Civil. Escuela de Ingeniería de Antioquia.
- INSTITUTO METEOROLÓGICO DE LOS PAÍSES BAJOS. Página web visitada en agosto de 2006. Artículo disponible en: http://www.knmi.nl/research/oceanography/enso/effects/monthly_temperature_effects.html.
- MAKHLOUF, Z. and MICHEL, C. (1994). A 2-parameter monthly water balance model for French watersheds. *Journal of Hydrology*, vol. 162, p. 299-318.
- OLSSON, J. (1998). Evaluation of a scaling cascade model for temporal rain-fall disaggregation. *Hydrology and Earth System Sciences*. Vol. 2, issue 1, p. 19-30.
- VÉLEZ, Jaime Ignacio (2001). Tesis doctoral. Desarrollo de un modelo hidrológico conceptual y distribuido orientado a la modelación de crecidas. Valencia, España. Universidad Politécnica de Valencia.
- VÉLEZ, Jaime I; POVEDA, Germán; MESA, Oscar José (2000). *Balances hidrológicos de Colombia*. 1ª ed. Medellín, Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, 150 p.
- NOAA-CIRES Climate Diagnostics Center (2005). Precipitation rate monthly long term mean. (online). <http://www.cdc.noaa.gov/cdc/reanalysis/reanalysis.shtml>.

