

GENERACIÓN DE CRECIDAS Y SU RELACIÓN CON LA URBANIZACIÓN EN LA SUBCUENCA DEL RÍO VILLALLOBOS

Juan Carlos Fuentes Montepeque

Ingeniero Agrónomo, M.Sc. Hidrología, ERIS-USAC, Guatemala
Instituto Nacional de Electrificación –INDE–, departamento de hidrología
Dirección para [recibir correspondencia jcfuentes24@gmail.com](mailto:jcfuentes24@gmail.com)

Recibido 20.01.2015 Aceptado 27.01.2015

RESUMEN:

La subcuenca del río Villalobos constituye la parte alta de la cuenca del río María Linda, se encuentra asentada parte de la ciudad capital de la república de Guatemala, así como municipios periféricos, región que ha experimentado un aumento constante de la población y consecuentemente de sus áreas urbanas. El cauce principal de la subcuenca es el río Villalobos, afluente principal al lago de Amatitlán. La investigación consistió en cuantificar el efecto asociado a la urbanización, sobre el ciclo del agua, principalmente sobre los componentes de escurrimiento superficial. Para estimar el impacto en el escurrimiento superficial, se modeló el hidrograma para el evento más extremo suscitado, siendo la tormenta tropical Agatha, para las condiciones de urbanización de los años 1972 y 2012. Los efectos sobre el hidrograma se estimaron en el caudal máximo, escurrimiento superficial (total y medio), tiempo de concentración, coeficiente de escorrentía así como los niveles de flujo alcanzados y ascensos estimados en el lago de Amatitlán. El aumento en las áreas urbanas en los últimos 40 años (aproximadamente 22%), ha ocasionado incrementos significativos en los componentes del hidrograma, caudal pico y escurrimiento superficial principalmente, disminuyendo únicamente en el tiempo de concentración.

PALABRAS CLAVE: Modelación, hidrograma, escurrimiento, crecida, urbanización, impacto.

ABSTRACT:

The basin of Villalobos River forms the upper part of the river basin Mary Linda, seated part of the capital of the Republic of Guatemala city and outlying municipalities, a region that has experienced a steady increase in population and consequently is its urban areas. The main channel of the subbasin is the Villalobos River, the main tributary of Lake Amatitlán. The research was to quantify the effect associated with urbanization on the water cycle, mainly on components of surface runoff. To estimate the impact on surface runoff hydrograph for the most extreme event raised was modeled, with Tropical Storm Agatha, for the conditions of urbanization in the years 1972 and 2012. The effects on the hydrograph is estimated at maximum flow, surface runoff (total and average), time of concentration, runoff coefficient and flux levels achieved and estimated at Lake Amatitlan promotions. The rise in urban areas over the past 40 years (approximately 22%), has caused significant increases in the components of the hydrograph peak flow and surface runoff mainly decreasing only in the time of concentration.

KEYWORDS: Modeling, hydrograph, runoff, flooding, urbanization, impact.

INTRODUCCIÓN

La subcuenca del río Villalobos, delimitada hasta el sitio donde desemboca en el Lago de Amatitlán, constituye un área de la parte alta de la cuenca del río María Linda, que drena hacia el océano Pacífico, ubicada en la planicie de la meseta central. La subcuenca en mención, se caracteriza por aumento continuo de las áreas urbanizadas, dado a que parte de la ciudad

capital de Guatemala y municipios periféricos se encuentran asentados en el área de drenaje de la misma. Según Yurrita (2013), se está en una nueva etapa del crecimiento, no desarrollo, de las ciudades en Guatemala, todas presionadas por la centralización del municipio del mismo nombre, además, menciona que ese proceso debería haberse apoyado en los siguientes pronósticos: el medio físico natural, la hidrología y clima, el nivel freático, el uso del suelo, las tasas de

crecimiento población actual (proyecciones), la estructura urbana como el crecimiento histórico, la subdivisión urbana, densidad de población, zonificación y tendencia de crecimiento. En Guatemala se estima que ha existido impacto en el régimen de lluvias, tal como lo menciona el Gabinete Específico del Agua (2009), citado en el Plan Sectorial Multianual de Ambiente y Agua 2001-2013. A nivel país, en los últimos 14 años se han observado eventos hidrometeorológicos extremos, como el huracán Mitch (1998), el ciclón tropical Stan (2005) y la tormenta tropical Agatha (2010), con efectos severos en la población que habita la subcuenca (especialmente este último). Por mencionar, los valores acumulados de lluvia durante la tormenta tropical Agatha (2010), son los más altos que se han observado en los registros (mayores a 30 años) de las estaciones meteorológicas ubicadas en el área de influencia de la subcuenca, adicionalmente, es el primer evento de esta naturaleza que sucede al inicio de la época lluviosa. El objeto del estudio fue estimar el impacto en el ciclo hidrológico, principalmente en la el escurrimiento superficial, debido a los efectos asociados al proceso de urbanización en la subcuenca. Cabe mencionar, que durante el desarrollo del mismo, se utilizaron técnicas hidrológicas avanzadas, que son de aplicabilidad para aumentar la confiabilidad de los resultados en este tipo de estudios. Se pretende que este estudio, constituya un instrumento técnico científico tendente a servir de base en programas de planificación hidrológica, obras hidráulicas, ordenamiento territorial y de manejo integral de cuencas.

DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

La subcuenca del río Villalobos se ubica en el área central de la república de Guatemala, su área se distribuye entre los departamentos de Guatemala y Sacatepéquez, comprendiendo los municipios de Mixco, Guatemala, Santa Catarina Pinula, Villa Nueva, Villa Canales, Petapa, Amatitlán San Lucas, Santa Lucía Magdalena y Milpas Altas. El área de la subcuenca mayoritariamente se ubica en el Departamento de Guatemala. La extensión territorial de la subcuenca se estima en 310 km², el cauce principal lo constituye el río Villalobos, el cual desemboca en el lago de Amatitlán en las coordenadas 90° 34' 12" longitud Oeste y 14° 29' 02" latitud Norte, a una altitud de 1,189 metros sobre el nivel del mar.

METODOLOGÍA

El objetivo de la modelación fue estimar el hidrograma generado durante la tormenta tropical Agatha y el hidrograma que se hubiese generado dada las condiciones de uso de la tierra en la subcuenca en el año 1972, así mismo los potenciales hidrogramas

generados a partir de las lluvias de diseño, de esa forma evaluar el impacto que ha tenido el proceso de urbanización. La lluvia de diseño que se consideró fue la observada en la red de estaciones meteorológicas actualmente en operación. Posteriormente, el hietograma de diseño fue el observado en la estación meteorológica INSIVUMEH, durante la tormenta tropical Agatha, el día 29 de mayo del año 2010, discretizado cada 10 minutos. Se seleccionó este evento por ser el más extremo observado durante los registros históricos disponibles. Se consideró el registro de la estación meteorológica INVISUMEH, debido a que es de alta confiabilidad, siendo una de las más importantes del país, además, del efecto que tienen las lluvias suscitadas en esta área de la subcuenca en la formación de escurrimiento superficial, tal como lo indican los análisis estadísticos realizados. La lluvia media ponderada durante la tormenta tropical Agatha, se estimó en 188 milímetros, la cual se obtiene al aplicar las áreas de influencia de los polígonos de Thiessen de cada estación. Cabe mencionar, que los valores de lluvia en cada estación meteorológica corresponden a períodos continuos en un lapso de tiempo de 24 horas. La lluvia ponderada de cada estación meteorológica se obtuvo al multiplicar el factor de acuerdo al área de influencia por el valor de lluvia observada. En el caso de la lluvia acumulada, se refiere al total de lámina de lluvia observada en los últimos cinco días previos a la tormenta tropical Aghata, para cada estación meteorológica, que comprende del 24 al 28 de mayo del año 2010. La metodología para estimar la lámina de lluvia efectiva fue la propuesta por el Servicio de Conservación de Suelos, correspondiente al modelo de los números de escurrimiento, el cual es un modelo de escurrimiento superficial de utilidad para estimar la precipitación efectiva, descrito por Hidalgo (2012). El modelo consideró lo siguiente:

- **Grupo hidrológico de suelos:** En función del potencial de escurrimiento y de infiltración, se obtuvo del mapa de permeabilidad.
- **Uso y tratamiento del suelo:** Se obtuvo de los mapas de uso de la tierra, de los años 1972 y 2012.
- **Condición hidrológica:** De igual manera se obtuvo de los mapas de uso de la tierra. Este concepto aplica únicamente a unidades que no están urbanizadas.
- **Condición de humedad antecedente:** La condición de humedad antecedente se estimó de acuerdo a la lámina de lluvia acumulada en los últimos 5 días previos al evento en estudio, de acuerdo con Sánchez (2008). Se estimó que la lámina media en la subcuenca acumulada o antecedente, fue de 122 milímetros, en tal sentido

se deduce que los suelos se encontraban a un contenido de humedad antecedente mayor a la capacidad de campo, conocido como AMCIII. En esta condición los suelos poseen el mayor potencial de escurrimiento y el menor potencial de infiltración.

Los números de curva se obtuvieron de las unidades de mapeo resultantes del traslape de los mapas de uso de la tierra y permeabilidad. Posteriormente, se corrigieron de acuerdo al contenido de humedad antecedente. Los datos utilizados en el modelo son los siguientes:

a. Modelo de cuenca

- **Área:** Se delimitó el área de la cuenca a partir de la estación hidrométrica Villa Canales, equivalente a 310 km².
- **Pérdidas o abstracciones:** Estimada en 65 mm, en base al modelo de los números de curva.
- **Transformación:** Modelo del hidrograma unitario.
- **Flujo base:** Se consideró el escurrimiento superficial medido en los días previos al evento, siendo de 10.9 m³/s.
- **Abstracción inicial:** En base a las características hidrofísicas de los suelos.
- **Valor del número de escurrimiento:** Estimado en base a las unidades de mapeo, considerando permeabilidad (grupo hidrológico), condición hidrológica, uso y tratamiento del suelo, así como el contenido de humedad antecedente.
- **Porcentaje de área impermeable o urbanizada:** Se estimó en base a los mapas de uso de la tierra, para los años 1972 y 2012, siendo de 10.52 y 32.36% respectivamente.
- **Tiempo de retraso:** Villón (2007), sugiere estimarlo como 60% del tiempo de concentración.
- **Tiempo de concentración:** Se utilizó la ecuación de Kirpich, recomendada por INSIVUMEH (2004), estimándose un valor de 270 minutos.

b. Modelo meteorológico

- Se ubicó las estaciones meteorológicas en operación.
- Se utilizó el hietograma específico, para la distribución de la lluvia en el tiempo.
- No se consideró evapotranspiración ni derretimiento de nieve.

c. Especificaciones de control

- Fecha y hora de inicio: 29 mayo del año 2010, a las 0:00 horas.
- Fecha y hora final: 31 de mayo del año 2010, a las 0:00 horas.
- Intervalo de tiempo: 10 minutos.

d. Series de tiempo

- La lluvia media observada en la subcuenca durante la tormenta tropical Aghata, se discretizó en intervalos de 10 minutos.

- El hietograma de diseño que se utilizó, como se mencionó anteriormente fue el observado en la estación INSIVUMEH.

e. Resultados de la simulación

- Se ploteó en un mismo gráfico, el hidrograma generado a partir del hietograma observado durante la tormenta tropical Agatha, considerando las condiciones de uso de la tierra de los años 2012 y 1972, con intervalos de 10 minutos.
- Se obtuvo los valores de precipitación, pérdidas, precipitación en exceso, escurrimiento directo, escurrimiento base, escurrimiento total y caudal máximo.

La calibración del hidrograma resultante del hietograma observado durante la tormenta tropical Agatha, se realizó aplicando el modelo hidráulico HEC-RAS, software desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros Hidrólogos del Ejército de los Estados Unidos (Hydrologic Engineering Center, U.S. Army Corps of Engineering). El procedimiento fue el siguiente:

- Se ingresó las secciones transversales levantadas con sus respectivos valores geométricos e hidráulicos. El coeficiente de rugosidad de las secciones transversales se asignó de acuerdo a la metodología propuesta por Cowan, citada por Chow (1994).
- Se modeló los perfiles de flujo de acuerdo al caudal máximo estimado con el modelo hidrológico, comparando con el nivel de flujo alcanzado durante la tormenta Agatha, la cual se utilizó de referencia.
- Una vez calibrado el modelo hidráulico, se estimó el hidrograma generado durante la tormenta tropical Agatha y el hidrograma que en teoría se hubiese generado para las condiciones del año 1972.
- Así mismo, se simularon los hidrogramas para cada lluvia de diseño estimadas de acuerdo al análisis de frecuencia.
- Adicionalmente, aplicó la ecuación citada por Tucci (2002), que relaciona el impacto climático sobre la lluvia y la variabilidad hidrológica (ocasionada por el cambio climático la variabilidad climática, o bien por cambios provocados por el hombre), esta última sintetizada en la variación del coeficiente de escurrimiento.

Con el objeto de estimar el aporte de escurrimiento superficial del área circundante al Lago de Amatitlán, en principio, se consideró que el volumen de escurrimiento superficial es equivalente al incremento de nivel del lago de Amatitlán (convertido a volumen) más el caudal desfogado en las compuertas operadas por el INDE, ubicadas en el drenaje del lago. Adicionalmente, se consideró la evaporación y la lluvia

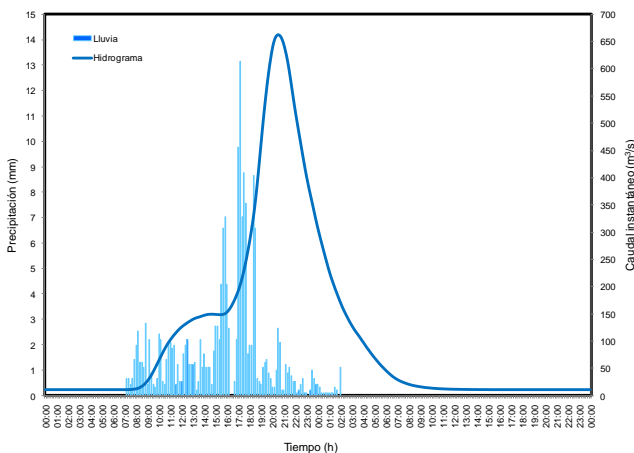
directa sobre el lago, de acuerdo a los registros de la estación meteorológica Compuertas Amatitlán. En este sentido se realizó un balance hídrico, establecido como una igualdad entre el volumen entrante y el volumen saliente.

- **Volumen entrante (Ve):** Se consideró 2 volúmenes entrantes de escurrimiento superficial. El principal volumen entrante al lago es el aportado por el río Villalobos (Vv). Existe otro volumen entrante superficial, el cual es el que se aporta en la parte baja del río y en el área circundante al lago (Vc). Adicionalmente, el volumen entrante al lago producto de la precipitación directa (Vp). Por lo tanto, el volumen entrante se denota como: $Ve = Vv + Vc + Vp$.
- **Volumen saliente (Vs):** El principal volumen saliente al lago es el desfogado (Vd) por las compuertas y el volumen equivalente a la evaporación directa (Vev). Adicionalmente, se consideró el volumen equivalente al ascenso del nivel del lago, producto del escurrimiento superficial (Va). Por lo tanto, el volumen saliente se denota como: $Vs = Vd + Vev + Va$. La ecuación del balance hídrico superficial (en unidades de m^3), quedó entonces como $Ve = Vs$, sustituyendo, $Vv + Vc + Vp = Vd + Vev + Va$.

RESULTADOS

Los resultados obtenidos, al plotear la precipitación y el caudal generado para las condiciones del año 2012, se muestran a continuación:

Figura 1. Hidrograma simulado durante la tormenta tropical Agatha.



Al realizar un balance entre las entradas y salidas al lago de Amatitlán, como cuerpo receptor del río Villalobos, se obtiene lo siguiente:

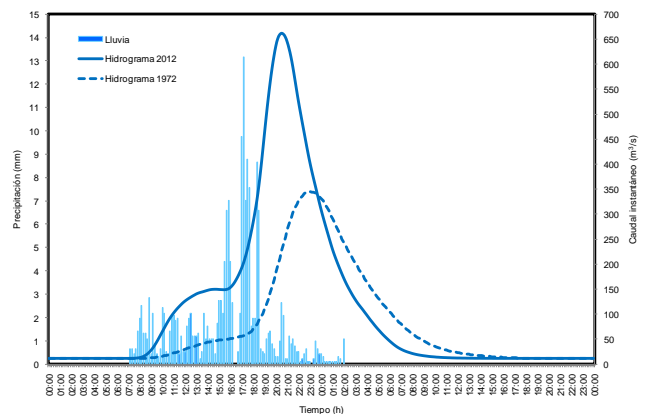
Tabla 1. Balance hídrico superficial en el lago de Amatitlán durante la tormenta tropical Agatha.

Entradas	Volumen m³	Salidas	Volumen m³
Escurrecimiento superficial	17,678,460	Desfogue	324,000
Lluvia directa	2,881,440	Evaporación	88,000
Escurrecimiento área lateral	1,454,196	Almacenamiento	20,960,000
Total	22,014,096	Total	21,372,000

Fuente: Elaboración propia.

En la siguiente figura se ilustran los hidrogramas simulados para ambos escenarios de urbanización.

Figura 2. Hidrogramas simulados para las condiciones de urbanización de los años 1972 y 2012.



En la siguiente tabla se muestran los componentes de los hidrogramas estimados para ambos escenarios.

Tabla 2. Principales componentes de los hidrogramas simulados.

Componente	Condición		Aumento o descenso (%)
	Antes	Después	
Caudal máximo (m ³ /s)	344.6	662.1	92
Caudal medio (m ³ /s)	64.3	102.3	59
Volumen escurrimiento (hm ³)	11.11	17.68	59
Coeficiente de escurrimiento	0.19	0.3	59
Tiempo de concentración (min)	330	200	-39
Ascenso máximo lago (m)	0.69	1.31	89

Fuente: Elaboración propia.

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El caudal máximo observado durante el evento se estimó en 662.1 m³/s, aproximadamente a las 20:30 horas del día 29 de mayo del año 2010, con un tiempo de concentración de 3 horas y 20 minutos, coincidiendo con lo que se establece teóricamente. Como se indicó previamente, el análisis fue realizado en un punto previo a la desembocadura del río Villalobos al lago de Amatitlán, debido a que existe un punto de monitoreo del flujo, además, la sección es estable. El área que no se consideró, es circundante al lago, que se estima 25.5 km², el aporte superficial de esta área se estimó mediante el concepto de caudal específico. Además, es necesario remarcar que el desfogue del lago de Amatitlán, fue obstaculizado el mismo día, a las 23 horas, por lo que a partir de ese momento se detuvo el caudal desfogado. El error obtenido entre el balance entre entradas y salidas al lago de Amatitlán, se estimó en 3%, el cual se considera aceptable para este caso de análisis hidrológicos. Este error también se estimó mediante la comparación del incremento alcanzado del nivel del lago durante el evento, el valor estimado y

observado es de 1.38 m y 1.31 respectivamente, lo que provee un error de 5%, encontrándose dentro de los intervalos de confianza recomendados. Se observa que el caudal máximo del hidrograma simulado para el año 1972, se estima en 345 m³/s, siendo el valor estimado para el año 2012 un 92% más alto. El tiempo de concentración se estimó en 5 horas y 50 minutos, siendo mayor en un 65% en relación a lo estimado para el año 2012.

En la tabla 2 se resume el efecto de la urbanización en cinco componentes de los hidrogramas generados, es notorio el efecto de la urbanización en el aumento significativo del caudal máximo, caudal medio, volumen de escurrimiento y coeficiente de escurrimiento. El único componente que disminuyó también de manera significativa es el tiempo de concentración, dado a que al haber mayor cantidad de áreas impermeables existe mayor captación y velocidad de las aguas de lluvia hacia colectores. Adicionalmente, se muestra el aumento considerable en el ascenso máximo ocasionado en el lago de Amatitlán. Los resultados muestran para ambos escenarios de urbanización un aumento que oscila entre 60 y 90% para el caudal medio y máximo respectivamente. Estos resultados concuerdan al aplicar la ecuación propuesta por Tucci (2002), donde se estima un 90% de impacto sobre el escurrimiento, especialmente en el caudal máximo y ascenso máximo, producto de la variabilidad de la lluvia y/o cambios en el uso del suelo. Existe un componente del hidrograma que no se estimó en este análisis, pero con certeza disminuyó, es el caudal base o flujo subterráneo, el cual recarga hacia el manto freático. En la actualidad el descenso del nivel freático en la mayoría de los pozos ubicados en la subcuenca, desciende constantemente, debido al aumento del escurrimiento superficial y disminución de la recarga hídrica. Estas estimaciones forman parte de estudios de hidrología subterránea, los cuales deben de realizarse con el objeto de estimar su comportamiento y proponer medidas efectivas de mitigación, de lo contrario, existe un riesgo potencial de subsidencia, el cual ya se ha dado en otras áreas urbanas en Latinoamérica.

Los resultados obtenidos muestran aceptable correlación entre lo observado y lo simulado. Esto comprueba que la modelación no solo se basa en análisis o técnicas avanzadas estadísticas y/o determinísticas, sino también en el conocimiento de las condiciones biofísicas particulares del área, su dinámica, los regímenes naturales (de lluvia y escurrimiento), efectos antropogénicos y naturales. En la medida que se aumente el conocimiento el área geográfica de interés y se apliquen las técnicas hidrológicas, los resultados obtenidos aumentarán en

precisión. En tal sentido, su aplicación y utilidad al servicio de la sociedad serán mayores. Lo anterior hace referencia a lo citado por Loague & Freeze (1985), lo que literalmente dice: "La modelación hidrológica es más un arte que una ciencia y es probable que siga siendo así. La utilidad de los resultados depende en gran medida del talento y la experiencia del hidrólogo, del entendimiento de los matices matemáticos del modelo en particular y de los matices hidrológicos de la cuenca en particular".

Es importante mencionar que a medida que el área de las cuencas disminuye resulta más fácil comprender los complejos procesos hidrológicos, así como sus consecuencias. Generalmente, cuencas con áreas mayores poseen mayores factores hidrológicos y dispersión espacial, aspecto mencionado por Chelmicki & Siwek (2009). Esto se relaciona con el modelo utilizado, siendo semidistribuido, dada las condiciones geomorfológicas y geográficas de la subcuenca del río Villalobos. Un modelo distribuido podría ser aplicado a esta subcuenca, lo cual conllevaría mayor detalle de la información básica así como del monitoreo hidrometeorológico, especialmente el escurrimiento superficial, el cual idealmente tendría que ser monitoreado en cada sitio de control de cada microcuenca que forman la subcuenca en estudio.

Las aplicaciones de este estudio son diversas, por mencionar algunas, planificación urbana, planificación ambiental, gestión de riesgos naturales, manejo de cuencas, modelación ambiental, aprovechamientos hidráulicos (considerando el lago de Amatitlán como un embalse natural así como su capacidad de amortiguamiento y laminación) y procesos de erosión.

CONCLUSIONES

El porcentaje de error de las simulaciones hidrológicas al realizar el balance hídrico del lago de Amatitlán, se estima en 3%, lo cual estadísticamente se considera que no es significativo, dada la naturaleza del análisis. Esto se relaciona con la red actual de estaciones meteorológicas, la cual se considera adecuada para fines de modelación hidrológica según las especificaciones establecidas por la OMM, además, al detalle de los métodos determinísticos y estadísticos utilizados.

Las áreas urbanas o impermeables aumentaron en 22% del área total de la subcuenca en los últimos 40 años, a una tasa de 0.55% por año, este proceso antropogénico ha tenido efectos directos sobre el ciclo del agua, principalmente ascensos en el caudal máximo, volumen de escurrimiento superficial y por ende en el coeficiente de escurrimiento. El impacto hidrológico producto de la urbanización en la

subcuenca es significativo, estimándose al menos un 60% de incremento en los principales componentes del escurrimiento superficial.

AGRADECIMIENTOS Y RECONOCIMIENTOS

A los Departamentos de Hidrología de INDE e INSIVUMEH, por proporcionar información hidrológica y meteorológica para la realización del estudio. Asimismo, a los Doctores Hugo Hidalgo, Lars Gottschalk y al Ing. Juan José Sandoval, por compartir conocimientos aplicados en modelación hidrológica.

BIBLIOGRAFÍA

- Chelmicki, W., & Siwek, J. (2009). Hydrological extremes in small basins. *Journal of International Geoscience*, 31-32.
- Chow, V., & Maidment, D. (1994). *Hidrología aplicada*. Colombia: McGraw-Hill.
- Hidalgo, H. (25 de Marzo de 2011). Notas del curso de modelado de la escorrentía hidrológica. San Pedro Montes de Oca, San José, Costa Rica.
- INSIVUMEH. (2004). *Estudio de lluvia máxima diaria en la república de Guatemala*. 2004: Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología.
- MARN. (2010). *Plan sectorial multianual de ambiente y agua 2011-2013*. Guatemala: Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales.
- Sánchez, S. (2008). *Proceso de lluvia-escurrimiento*. Michoacán: Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Tucci, C. (2003). *Impactos da variabilidade climática e do uso do solo nos recursos hídricos*. Brasil.
- Villón, M. (2007). *HEC-HMS: Ejemplos*. Cartago: Editorial Tecnológica de Costa Rica.
- Yurrita, A. (7 de Febrero de 2013). Urbanismo y sociedad: crecimiento urbano "las ciudades en Guatemala crecen pero no se desarrollan". *Prensa Libre*, pág. 18

INFORMACIÓN DEL AUTOR:

M.Sc. Hidrología, graduado del Programa de Posgrado en Ciencias de la Atmósfera de la Universidad de Costa Rica, 2013

M.Sc. Recursos Hidráulicos Opción Hidrología, graduado de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos de la Universidad de San Carlos de Guatemala, 2008

Especialista en Planificación y Manejo de Recursos Hídricos, graduado de la Facultad de Agronomía de la Universidad de San Carlos de Guatemala, 2006

Ingeniero Agrónomo, graduado en la Universidad de San Carlos de Guatemala, 2001