

# Estado del arte de los canales que sigue el agua en una cuenca

## State of the art channels that keep water in a basin

Jaime Izquierdo Bautista<sup>1</sup>

### Resumen

Los procesos de lluvia escorrentia son muy importantes en las cuencas. Determinar cuáles son los canales que sigue el agua en la cuenca, ayuda a entender su dinámica. Fenómenos como la condensación por niebla, el agua capturada por el follaje, la infiltración en el suelo, la percolación, los aportes de las aguas subterráneas a los canales o ríos hacen parte de los diversos elementos que forman parte de la cuenca. Determinar los tiempos de tránsito, que factores intervienen en su determinación, que metodologías actualmente se utilizan hacen parte de los cometarios de este artículo. Con la ayuda de trazadores químicos, la toma de datos reales y software desarrollado para este fin se pueden hacer predicciones del comportamiento de las cuencas.

*Palabras clave:* Lluvia escorrentia; modelación; cuencas

### Abstract

Rainfall-runoff processes are very important in the basins. Identify the channel that follows the water in the basin, it helps to understand its dynamics. Phenomena such as fog condensation, water captured by the foliage, the soil infiltration, percolation, the contributions of groundwater or river channels are part of the various elements that are part of the basin. Determine transit times that factors involved in determining which methodologies currently used are part of the comments of this article. With the help of chemical tracers, the actual data collection and software developed for this purpose can make predictions of the behavior of the basins.

*Keyword:* Rain runoff; modeling; watershed

---

<sup>1</sup> Magister en Ingeniería Civil. Docente Universidad Surcolombiana. Av. Pastrana Borrero carrera 1ª Neiva. Email: jaimeizquierdo@usco.edu.co

## 1. Introducción

En Colombia se reglamentó recientemente la planificación, ordenamiento y manejo de cuencas hidrográficas acuíferas. (Minambiente, 2012). Por lo anterior es necesario el conocimiento del comportamiento de las cuencas. Con datos históricos de precipitación y caudal se puede hacer algunas predicciones, IDEAM (2004), pero las rutas que sigue el agua desde que se infiltra hasta que es cedida nuevamente al cauce, es un renglón relativamente nuevo de investigación en hidrología.

Es así como se han ideado metodologías para determinar cuáles son los tiempos que demora el agua almacenada en la cuenca, bajo que fenómenos o variables este empieza o termina de ceder el agua a la cuenca. Entender estos procesos es importante para poder planificar el desarrollo o la recuperación de una cuenca, el vivir armonioso de la gente con la naturaleza, que se puedan obtener recursos naturales de manera sostenible y no degradarlos por el mal uso o por desconocimiento.

Se pueden aplicar los conocimientos actuales en la cuenca río Las Ceibas, que abastece de agua potable la ciudad de Neiva, siendo este afluente el único que cumple esta función para una ciudad intermedio que ronda los 400.000 habitantes. Se puede considerar como un Ecosistema Estratégico para la ciudad, pues como lo definió Olaya et al. (2003) son sistemas con productos, atributos y funciones naturales, indispensables para mantener la vida animal y vegetal y hacer viable una vida digna y el desarrollo sostenible de la especie humana como ser biológico y cultural.

Lo anterior indica que esta cuenca se debe cuidar y mejorar por los servicios ambientales que ofrece a la parte rural y urbana. Es necesario determinar cuáles son las vías que sigue el agua en la cuenca, como ingresa esta y de qué manera la cede, entendiendo estos procesos se pueden trazar directrices de como se debe manejar la cuenca y por donde se debe hacer su recuperación o estabilización.

## 2. Metodología

### 2.1. Métodos de estimación de tiempos de tránsito

Conceptos hidrológicos fundamentales, en una cuenca, como la relación de precipitación, escurrimiento y el conocimiento del hidrograma unitario son fundamentales para la determinación del tiempo de tránsito en una cuenca. Por medio de estos se puede estimar obras a construir, su dimensionamiento y ubicación, así como la determinación del nivel de aguas máximas. Con coberturas boscosas naturales, ante una lluvia, la escorrentía aumenta hasta un 10%, mientras que con pastos esta se puede elevar hasta un 40%. (Solís, 2003) (Muñoz et al 2013). En un ecosistema de bosque húmedo montano tropical en el sur del Ecuador se estudiaron algunas parcelas que se habían intervenido por el hombre, algunas con deslizamientos de tierra y se compararon con los bosques naturales de esta zona. Se concluyó que las zonas intervenidas por el hombre disminuían su conductividad hidráulica, perjudicando el desplazamiento vertical del agua en eventos de lluvias. En la medida que las parcelas presentaban recuperación, por no intervención en el tiempo, esta conductividad se recuperaba. (Zimmermann et al, 2009)

Los caudales en las zonas de las cuencas se pueden determinar haciendo medidas en periodos cortos de tiempo. Tomando valores absolutos cada hora para encontrar los cambios que se presentan en este periodo de tiempo y en cada zona, para luego reunir todos y determinar un caudal total en la cuenca y en un tiempo determinado. (Baker et al, 2004)

Los humedales, son otro ejemplo de captación donde se almacena el agua durante largos periodos de tiempo, más largos que en otros lugares de captación, prolongando el tiempo de respuesta promedio de agua en sus cuencas y la reducción de los rendimientos anuales. Los bosques también parecen aumentar el tiempo de respuesta de agua, pero en menor medida que los humedales. La cuenca boscosa tiene un comportamiento más consistente, que muestra que, incluso para grandes eventos que tiene una capacidad para mejorar los caudales de aguas pluviales. La respuesta distinta de las cuencas de los eventos de lluvia demuestra a través de diversos indicadores y la influencia de las condiciones de precipitación antecedente y las características de los eventos individuales se puede mostrar en la distribución del tiempo de tránsito (IDT) y la distribución del tiempo de respuesta (TTD) en la escala de tiempo corto, mientras que se aprecia la influencia de las diferencias de uso de la tierra tanto en las escalas de tiempo cortas y largas. (Roa-García, 2011) (Cadot et al, 2012)

Al utilizar la edad del agua y el tiempo de retención en la cuenca se pueden determinar las trayectorias del flujo, dando una fuente simple para la escala en la evaluación de la cantidad, con lo cual se pueden calcular los tiempos de tránsito, y calidad del agua basado en modelos conceptuales. Al utilizar los tiempos de retención, determinados experimentalmente, ayudan a la evaluación y selección del modelo apropiado, de acuerdo con las variables involucradas, relacionando la escala de las secciones de la cuenca a toda la extensión de esta. Se escogieron 6 parámetros (Ley potencial, porosidad del suelo, conductividad hidráulica, el punto de marchitez, el índice de tamaño de poro y la porosidad efectiva) para probar cuatro modelos ideados por los autores, los cuales involucraron 3, 4, 5 y 6 parámetros. Los modelos planteados pueden reproducir muy bien el flujo, pero no para reflejar la dinámica del tiempo de retención. Los modelos basados físicamente, estas hechos para calcular los saldos y flujos de agua en la cuenca, pero un modelo que además de lo anterior, también calcule el tiempo de residencia es mucho más real. (Vaché et al, 2006) (McGuire et al, 2006)

## 2.2. Características de la cuenca relacionadas con los tiempos de tránsito

El desarrollo de modelos como el Hidrológico Multilineal Discreto de Retraso y Tránsito de Crecientes estima los parámetros a partir de las características geométricas del canal, las cuales son calculadas con ayuda de la geomorfología. El modelo, al calcular los parámetros para el canal en cada pixel, distribuido especialmente. Además, el modo multilineal del modelo recalcula sus parámetros en el tiempo. (Giraldo et al 2005). Se realizó el estudio de un antiguo bosque en la Cordillera de Talamanca, Costa Rica, de 35 m de altura, dominado por robles y poco afectados por la niebla. La importancia hidrológica de epifitas en el bosque estudiado es bastante limitada a pesar de su gran capacidad de almacenamiento de agua máximo. Esto se cree que refleja el hecho de que bajo las condiciones de lluvia prevaletentes sólo una fracción del potencial de almacenamiento está realmente disponible. Se encontró que estas plantas solo interceptan el 6% de la lluvia total, además, si se presentan lluvias todas estas saturadas, capturando poca lluvia. (Holscher et al, 2004)

Investigaciones sobre las coberturas comparan los caudales de agua de dos micro -cuenas adyacentes cubiertas por bosques secundarios de 20 años de regeneración, con uno montano bajo maduro, en el centro de Veracruz, México en un periodo de 2 años. Lluvia (P) y caudal (Q) se midieron de forma continua, mientras que la evaporación en el follaje seco (transpiración Et), la evaporación del dosel húmedo (lluvia interceptación I), y la interceptación del agua de nubes (CIT) se cuantificaron utilizando una combinación de mediciones de campo y la modelización. Las características de caudal muy similares de los dos bosques no indica diferencias en las propiedades físicas e hidráulicas del suelo, lo que sugiere que 20 años de regeneración natural es capaz de reproducir un comportamiento hidrológico parecido al original (Muñoz-Villers et al 2012) (Wohl et al 2012) (Molina et al 2012) (Molina et al 2007) (Tromp-Van et al 2006). La producción de agua en un cultivo y en la zona natural son similares, sin embargo en el cultivo el flujo se deteriora más rápido, mientras en la zona reforestada se presenta una disminución del caudal de 242 mm/año. (Buytaert et al 2007)

Las formas de la superficie de la tierra no son suaves, presentan ciertas irregularidades y rugosidades. Se modeló, tanto en el espacio como en el tiempo estos efectos, del llenado de las cavidades superficiales, la conexión entre ellas y el proceso de escorrentía. Se determinaron los índices de conectividad y duración para ver el umbral de la generación del flujo superficial. La variación de la lluvia en el tiempo no alteró el proceso de escorrentía pero cambia la sincronización de llenado y conexión. Lo anterior puede influir en los tiempos de tiempos de tránsito y debería tenerse en cuenta para la estimación de este. (Yang et al 2013)

La preocupación por los cambios de paisajes en los páramos andinos y de otras regiones ha llevado a algunos investigadores a proponer lineamientos para que esto no ocurra o deje de ocurrir. Celleri et al (2009) (Toledo-Aceves et al 2011) proponen que se deben conseguir recursos para financiar estudios y proteger los páramos, desarrollar proyectos integrales para entender como es el funcionamiento hidrológico y ecosistémico de estos, hacer estudios comparativos sobre la intervención en estos paisajes y su monitoreo constante, siempre involucrando la población. Poulenard et al (2001) adelantó estudios sobre cómo cambia el comportamiento hidrológico y de retención de agua si los pajonales son removidos, incorporados a la agricultura o sometidos a quemadas, donde se evidencia que la escorrentía aumenta notablemente, bajando la retención de agua, elevando la sedimentación y la exposición directa al sol, en comparación con los no intervenidos; de igual manera Díaz et al (2002) hallaron reducciones en la saturación del suelo al ser intervenido por el hombre. Con lo cual hay la necesidad de determinar la conductividad hidráulica, explorar las estructuras internas del suelo, estudiar los caminos del agua en la zona saturada, en el sitio o en condiciones controladas de laboratorio. Para determinar los caminos sub superficiales del agua se usan trazadores como el azul brillante, el cual se aplica al suelo, en un tiempo, en una calicata aledaña se puede establecer la profundidad alcanzada. (Blume et al 2008) Como no se tienen datos de series de tiempo se

tomaron los datos de campo para determinar las funciones hidrológicas de esta cuenca, lo cual ayuda a la comprensión de su funcionamiento. (Blume et al 2008)

La precipitación es un factor en las cuencas incidente en otros fenómenos, como la escorrentía, la infiltración y el transporte de sedimentos. En el sur de Ecuador, en el Nudo de Loja se realizó el estudio de la variabilidad de la lluvia en las cuencas debido a la topografía y la influencia de los vientos. Con la asistencia de radares y medidores de lluvia sobre la zona se encontró que la cantidad de lluvia caída varía en algunos lugares de 1000 Hasta 6000 mm año y el gradiente que debería disminuir con la altitud, de acuerdo con los datos tomados en otros lugares del mundo, aquí aumenta constantemente, lo cual ya lo habían confirmado otros investigadores. (Guiambelluca et al 2011, Schawe et al 2010) Este comportamiento es debido al obstáculo que representan las montañas y el flujo de las masas de aire provenientes de la Amazonía. (Rollenbeck et al 2011)

Como los procesos de escurrimiento y su heterogeneidad en los bosques, aún no se comprenden bien, en Ecuador se realizaron mediciones para estudiar este fenómeno. Se colectaron datos, por un periodo de cuatro años, en un bosque natural y otro manejado, donde se recogían datos semanales de la lluvia que cae y la interceptada por el follaje. La variabilidad espacial por el escurrimiento en los bosque fue alta, pero estable durante el tiempo observado. El dosel de los árboles controla el escurrimiento, con esta alta variabilidad se contribuye a la gran diversidad biológica de estos bosques andinos. (Wullaert et al 2009) (Wilcke et al 2009)

### 2.3. Distribución de los tiempos de tránsito

Las regiones tropicales de montaña se caracterizan por fuertes gradientes climáticos espaciales que, junto con la limitada cantidad de datos y conocimientos de los procesos subyacentes dificultan la gestión de los recursos hídricos. Especialmente para la predicción a escala regional, es importante identificar los factores dominantes que controlan la respuesta de precipitación-escorrentía y vincular a los patrones espaciales conocidas de clima, suelos y vegetación. La hidrología de las micro- cuencas estudiadas se determinó, la cantidad media anual de las precipitaciones, régimen de lluvias y la pendiente controlada principalmente por la secuencia de los horizontes del suelo y la conductividad hidráulica lateral saturada de cada horizonte. Se puede asumir que en condiciones de secas el componente de flujo lento consiste en el flujo lateral en el horizonte C y las contribuciones de la capa superior en el lecho de roca, el llamado flujo base. Bajo condiciones húmedas el componente de flujo lento representa el flujo lateral en el horizonte orgánico y la capa de hojarasca, que podría considerarse como una forma de flujo intermitente. El flujo superficial se produce más probablemente por el exceso de saturación. Aunque parece que en todas las microcuencas estudiadas, además de la magnitud de la precipitación y la variedad de propiedades de captación, la respuesta hidrológica está dominada por las propiedades físicas del suelo. Los controles de contenido de agua del suelo previamente ganados en las capas del perfil del suelo contribuye principalmente al componente de flujo lento del caudal, siendo en todas las microcuencas estudiadas el principal contribuyente al caudal total. (Crespo et al 2011)

El tiempo de tránsito puede ser una información fundamental para saber sobre el almacenamiento, los canales de flujo y las características del agua en una cuenca. El tiempo medio de tránsito en una cuenca puede ser mayor que la escala de tiempo hidrológica y sigue habiendo desconocimiento de la forma de las distribuciones del tiempo de tránsito en la cuenca. De acuerdo con estos planteamientos se pueden sugerir varias preguntas para direccionar nuevas investigaciones, ¿Cómo puede una alta densidad de muestras de lluvia y agua de los ríos, tanto espacial como temporalmente, desarrollar en estado no estacionario, nuevas distribuciones del tiempo de tránsito a escala de cuenca?, ¿Cómo se puede generalizar la forma del tránsito de tiempo y utilizarla como si el tiempo no variara en un sistema dinámico y cómo varía la distribución en el tiempo y en el espacio?, ¿Cuáles son los procesos físicos y las propiedades de los materiales que afectan la distribución de tiempo de tránsito y porque varían con el tiempo, las condiciones ambientales y el lugar?, ¿Cómo se puede abordar los problemas de dispersión numérica, el agua detenida, zonas de almacenamiento de sustancias para saber la distribución del tiempo de tránsito con el menor cantidad de variables adicionales en los modelos hidrológicos? (McDonnell et al 2010).

Durante el periodo húmedo, la respuesta a la escorrentía fue rápida, mostrando un aumento progresivo, con lluvias previas, aportando agua desde un 35% hasta 99% del total de la creciente. Los isotopos que se determinaron en el agua, mostraron que los tiempos de residencia de 5 semanas a una profundidad de 30 cm y de 6 meses a 120 cm, sin que cambien estas edades en la dirección de la pendiente. El flujo base presenta una edad mayor a dos años, indicando una gran capacidad de almacenamiento y regulación en la salida. Lo anterior indica que los flujos que se producen a poca profundidad no controlan el flujo de la respuesta hidrológica, sino que la alta permeabilidad hace que el agua percole rápidamente, llegando a recargar las zonas más profundas, haciendo que la respuesta al flujo este dominado por la descarga de las aguas subterráneas. Se demuestra así, que las lluvias altas en la época

húmeda junto a la alta percolación y la capacidad del suelo para el almacenamiento son factores importantes que intervienen en la estación seca, sosteniendo el caudal base y moderando las precipitaciones extremas que tienen relación con el cambio climático. (Muñoz et al 2012) Hay la necesidad de hacer una revisión del pensamiento actual sobre la generación de escorrentía en los ecosistemas forestales. Inicialmente, cualquier vía hidrológica posible debe considerarse hasta que no se demuestre lo contrario, en lugar de excluir las vías posibles a priori porque el pensamiento actual de las declara improbable o imposible. (Elsenbeer et al 1996)

#### 2.4. Uso de trazadores para describir los tiempos de tránsito

En tres cuencas pequeñas empinadas de bosque montano tropical se recogieron muestras de agua de escorrentía, flujo lateral, suelo mineral y agua corriente en un periodo de un año. Las muestras de agua fueron analizadas para los isótopos O y H, para identificar los caminos de flujo preferenciales del agua en el suelo y su relación con eventos de lluvia y la humedad inicial. En los eventos de lluvia la capa orgánica se satura rápidamente y fluye al canal de corriente paralelo a la superficie, con caudales mayores que en el suelo mineral. Las rutas de flujo de agua son principalmente en la dirección vertical a través del perfil del suelo en condiciones normales de humedad, cambiando a lateral en eventos de tormenta. Con el análisis de las muestras colectadas y la identificación de las vías de flujo se evidencia que la pérdida de la capa orgánica y la destrucción de los bosques cambia en gran medida los procesos de generación de escorrentía. (Goller et al 2005)

Se investigó en Ecuador, como son los procesos de química y escurrimiento del agua lluvia en los follajes de los árboles en una cuenca alejada de intervenciones antropogénicas. Se recogió lluvia y se analizaron elementos como K, Na, Ca, Mg, N, P y C orgánico. El escurrimiento fue medido en 79 % de la lluvia, con concentraciones bajas de los solutos medidos, sin embargo la variabilidad es poca y las concentraciones provenientes del dosel se mantuvieron estables. El patrón de escurrimiento resulta heterogéneo para este tipo de bosques en Ecuador pero los elementos analizados permanecen estables, por lo menos en el periodo de 72 horas analizado, este procedimiento se puede utilizar para la determinación de los flujos de nutrientes y seguir las rutas del agua en la cuenca (Zimmermann et al 2007) (Bucker et al 2010).

En Bolivia se llevó a cabo la medición del comportamiento de la lluvia en el paso por las capas del suelo en una cuenca de alta montaña. Se utilizó como trazador el cloruro de sodio en varias concentraciones, sitios y longitudes. Se observó que el tiempo de retraso en las zonas de pendiente es de 24 horas y para las zonas con depósitos sedimentarios se extendió hasta 48 horas. Lo anterior también depende de la época de lluvias o secas y de la humedad inicial del suelo. (Caballero et al 2002)

Kendall y McDonnell (2006) recopilan en su libro los fundamentos de pequeñas cuencas y los isótopos que se usan para determinar los tiempos de retención, para determinar cómo son los caminos que sigue el agua en la cuenca, al igual que el uso de estos en las aguas subterráneas cada uno con casos e estudio que se han dado en el mundo. Otros autores como Rodgeds et al (2005), realizaron estudios para determinar los tiempos y caminos de agua en cuencas mediana, experimentaron en zonas pequeñas y grandes, compararon y concluyeron que al aumentar la escala de tiempo no hay mucha diferencia entre los tamaños de las cuencas.

#### 2.5. Modelación hidrológica de cuencas

Los modelos hidrológicos deben ser fiables y robustos pues estas cualidades influyen en todas las aplicaciones basados en la producción del modelo. (Perrin et al 2001). Para el año 2004 se realizó el proyecto de intercomparación de modelo distribuido para comparar modelos distribuidos, entre ellos, y con un modelo agrupado para determinar las proyecciones de ríos en los Estados Unidos. Esto sirvió para detectar la necesidad de mejorar continuamente en la estimación de datos de precipitación y los investigadores poder desarrollar sus modelos. (Smith et al 2004). La fase 2 del Proyecto de Intercomparación de Modelo Distribuido se hizo en ríos de Estados Unidos, para comparar con el modelado de los diversos modelos creados que tratan de predecir la operación de los ríos, inundaciones y la utilización del recurso agua. Se hacen análisis estadísticos para evaluar el desempeño de los modelos cuando calculen el volumen de escorrentía, el flujo máximo y los picos alrededor de 40 eventos. En general, los modelos distribuidos predijeron bien los caudales de salida y parciales dentro de la cuenca. Los modelos distribuidos presentaron mejor desempeño, sin embargo es posible que no supere a los modelos agrupados, en cálculo del caudal de salida. (Smith et al 2012)

El modelo AWRA -L calcula el balance hídrico de los paisajes continentales en Australia. Para que se tengan datos precisos es necesario determinar la capacidad de retención de agua del follaje, la tasa de evaporación del follaje y el índice de pluviosidad media. Para conocer la cantidad de agua que se genera una región, el modelo

utiliza los datos que posee y esto puede llevarlo a subestimar los valores, por esto, se comparó con datos de campo y se hicieron mejoras para una predicción más acertada. (Wallace et al 2013)

La comparación de varios modelos de simulación de cuencas se ha hecho para verificar su funcionamiento en zonas tropicales, en condiciones de topografía alta y precipitación variable. Al sur de Ecuador en una cuenca de 75 Km<sup>2</sup>, se evaluaron los modelos HBV espacialmente distribuido, HEC-HMS, SWAT, CHIMP y LASCAM semi distribuidos y el totalmente distribuido HBV-N-D. Con datos recolectados durante un año, se procedió a su calibración y modelación. Se encontró que los modelos no tenían en cuenta el agua subterránea para el cálculo de la generación de escorrentía, sin embargo los resultados pueden ser una guía para observar este comportamiento, pero hay que mejorar la conceptualización que presentan. (Plesca et al 2012). El sistema de modelación modular (MMS) incluye herramientas ya creadas y que funcionan integradas para poder hacer modelación de diferentes disciplinas valiéndose de los sistemas de información geográfica como el SIG Weasel basado en ArcInfo (ESRI 1992) que permite el análisis y manipulación de representaciones del terreno, también se han acoplado software hidrológicos como TOPMODEL (Beven et al 1995) que realiza estos procesos con hidrogramas, flujos caudales picos, lluvia escorrentía entre otros. La ventaja de este tipo de herramientas es que son libres y se pueden hacer aportes a la comunidad científica en la medida que se van usando en diversos temas. (Leavesley et al 2002)

En Ecuador en la región sur, se midió la lluvia incidente, las características de humedad del suelo, la evaporación, la interceptación de la lluvia en las hojas y el escurrimiento que se produce, entre otras, tal como lo habían hecho Kinner et al (2004). Se determinaron los caudales sobre los arroyos con vertederos y el escurrimiento en los árboles, pero estos datos, debido a su variabilidad produce cierta incertidumbre, así como las mediciones naturales de agua, la entrada de datos, elementos no considerados en el balance hídrico y la arquitectura del modelo que se utilice (Melching 1995). En Ecuador, se mostró que se producen alta evapotranspiración por su ubicación geográfica, pero falta hacer más investigación sobre los paisajes de bosques que se encuentran en constante amenaza. (Fleischbein et al 2006)

Los modelos concebidos en una escala, muchas veces no se pueden extrapolar a otra mayor, en un área más grande. En una ladera Panola en Georgia EE. UU. bien estudiada y monitoreada se han llevado a cabo estudios puntuales como los de llenado y descarga (Tromp-Van et al 2006a) donde se encontró que 55 mm de lluvia llenan las depresiones en el lecho de roca y el flujo sub superficial comienza. Pero lo anterior no se refleja en escalas mayores y se desvía de su comportamiento. Al cesar la lluvia queda el escurrimiento, pero con lluvias mayores de 1 mm más del 50 % de las veces se presenta flujo hacia la corriente (Peters et al 2003). Se demuestra que los modelos no son consistente con las mediciones efectuadas en campo, sin embargo hacer la investigación en varias escalas espaciales da información útil para comprender el comportamiento de la cuenca. (Clark et al 2009).

Se han dado algunas pautas para la escogencia del un modelo apropiado, dentro de estas se destacan la disponibilidad del modelo, porque puede servir, si es demasiado costoso o es difícil su manejo; si predice las variables que se necesitan; se tienen limitantes en los supuestos del modelo debido a lo que ya se sabe de la respuesta hidrológica de la cuenca; se tiene los insumos o las entradas del modelo para que este de sus respuestas en un tiempo de trabajo moderado. Con estos criterios pocos modelos cumplen, sin embargo hay que observar las incertidumbres y evaluarlas si es posible, para la escogencia del modelo. (Beven 2006).

El concepto de modelo de simulación de la escorrentía en las cuencas se basa en tener tres tanques los cuales interceptan la lluvia, el primero representado por el agua en el follaje de los árboles y la superficie del suelo, el segundo en el almacenamiento en el subsuelo y el tercero en el almacenamiento profundo. Durante el arranque del modelo de tanques, se utilizó un periodo de seis meses, para observar como era el comportamiento de la hidrología en las cuencas. Posteriormente se hizo un análisis de incertidumbre sobre las variables, principalmente por las entradas, debido a la variabilidad del clima y la heterogeneidad de las precipitaciones. Representando el modelo de tanques por dos o tres depósitos se puede caracterizar una función de la humedad total del suelo. La simplicidad del concepto de modelado es una ventaja y se relaciona con el suelo, permitiendo que cuencas no aforadas den detalles de su comportamiento hidrológico. De acuerdo a lo anterior, se puede reunir varias cuencas pequeñas para realizar modelados de cuencas en una escala más grande. (Crespo et al 2012).

### 3. Resultados

La determinación de los tiempos de tránsito en las cuencas se debe a varios factores que influyen como son la precipitación, el tipo de suelo, la pendiente, su cobertura entre otras. Tal como lo han reportado Solis (2003),

Muñoz Viller (2013), Beaker (2004), Roa-García (2011) los usos que se le dan a los suelos determinan los tiempos de discurrir el agua, la generación de la escorrentía y los caudales que se alcanzan en un momento dado.

La forma de la cuenca, sus características de pendiente, su altitud y su ubicación geográfica hacen que la captación y los procesos de escorrentía se vean afectados y son necesarios determinarlos claramente para poder estimar la producción de agua en una zona o en toda la cuenca. Giraldo (2005), McGuire (2006), Muñoz-Viller (2012), Wohl (2012) han encontrado que a pesar de la degradación de algunas zonas, intervenidas por acciones antrópicas, con alguna recuperación del 10 % o más ya presentan respuestas positivas del comportamiento hidrológico, tratando de volver a los indicadores que tenían cuando aún no eran intervenidas.

Crespo (2011), McDonnell (2010), Muñoz-Viller (2012) han analizado el flujo del agua bajo diferentes estratos del suelo, como son los suelos con alta permeabilidad o los que se han visto afectados por costras superficiales que le impiden una rápida entrada de agua. El estudio de estos flujos deja ver como es el comportamiento hidrológico, cuánto dura el agua en tránsito por la cuenca y con qué caudal la sueltan cuando se presentan lluvias repentinas, en estado de saturación o después de periodos secos. El tener claro estos conceptos de comportamiento en una cuenca se puede entender cuáles son las áreas que mayor agua almacenan y en que tiempos la van cediendo a los cauces. Por lo anterior es necesario hacer pruebas reales en campo, que estas sean rigurosas, saber los horizontes de suelo que se presentan para comprender los caminos que sigue el agua.

Una manera de encontrar los canales que sigue el agua en una cuenca es por el estudio de trazadores químicos. Goller (2005), Zimmermann (2007), Wullaert (2009), Bucker (2010), Kendall y McDonnell (2006), Blume (2008) han llevado a cabo experimentos reales para determinar cuál es tiempo que transcurre desde que el agua ingresa a la cuenca hasta que esta es descargada en su salida. Seguir el recorrido de nutrientes para observar como es su movimiento en la cuenca, el seguimiento de isótopos del agua para ver cuánto tarda en los almacenes que posee la cuenca o con trazadores como el azul brillante para observar su recorrido en un tiempo determinado ayuda a comprender el comportamiento hidrológico de la cuenca, además de la permanencia en los depósitos, bajo qué condiciones comienza a salir a las corrientes superficiales y con qué tasa, son aspectos fundamentales a entender para poder orientar en el manejo de una cuenca.

Llevar el comportamiento hidrológico de la cuenca a un modelo numérico depende de muchos factores. Beven (1995, 2006), Perrin (2001), Smith (2004, 2012), Wallace (2013), Clark (2009), Fenicia (2011) han propuesto, hecho ensayos y comparaciones entre modelos y han dado recomendaciones sobre el uso de estos. Lo principal es que el modelo tenga unas variables de entrada fidedignas, reales, pensando en que así mismo van a ser los resultados, no tener demasiadas variables, pues esto le introduce incertidumbre que le hace perder efectividad y en lo posible que el modelo sea calibrado y luego si realizar los cálculos de las predicciones que sean necesarias. Existen muchos modelos, sin embargo los investigadores insisten en que estos sean libres y que se le puedan hacer aportes de acuerdo con las áreas que se van modelando, para que toda la comunidad científica se beneficie.

#### 4. Conclusiones

La determinación de los tiempos de tránsito se hace a través de recolectar datos de campo, para luego procesarlos, de la calidad de estos dependen los resultados. Las características de la cuencas pueden afectar estos valores, pues donde se consideran pendientes, suelos o coberturas homogéneas se puede inducir a errores, sin embargo hay que evaluar este grado de incertidumbre.

El estudio de las vías que sigue el agua en una cuenca ayuda a aclarar cuál es el comportamiento de esta. Teniendo claro cuáles son los tiempos de almacenamiento, las recargas, el control de la lluvia escorrentía, los sitios de entrega de caudal en la cuenca ayuda a tomar decisiones de donde se debe intervenir para su recuperación o conservación.

En la actualidad se han desarrollado un gran número de modelos matemáticos de cuencas, pero estos dependen de algunos factores como las entradas, las cuales tienen que ser reales para obtener resultados buenos, que reflejen la realidad. El hecho que un modelo necesite más variables para su proceso, lo puede hacer más preciso en algunos aspectos, pero esto lo puede convertir en complejo, con muchos grados de libertad y mayor incertidumbre. Actualmente se busca que los modelos sean muy sencillos, con la menor cantidad de variables pero que su resultado sea el reflejo de la realidad.

## 5. Referencias Bibliográficas

1. Alcaldía Municipal de Neiv. Departamento de Planeación Municipal, Plan de Ordenamiento Territorial Municipio Neiva 2000-2010.
2. Baker, D. B., Richards, R. P., Timothy, T., Loftus, T. T., and Kramer, J.W.: A new lachiness index: characteristics and applications to Midwestern rivers and streams, *J. Am. Water Resour. As.*, 40, 503-522, 2004.
3. Beven KJ, Lamb R, Quinn PF, Romanowicz R, Freer J. 1995. TOPMODEL. In *Computer Models of Watershed Hydrology*, Singh VP (ed.). Water Resources Publications: Highlands Ranch, CO; 627-668
4. Beven, K. J. 2006. Rainfall-Runoff Modeling: Introduction. *Encyclopedia of Hydrological Sciences*.
5. Blume T, Zehe E, Bronstert A. 2008. Investigation of runoff generation in a pristine, poorly gauged catchment in the Chilean Andes. II: Qualitative and quantitative use of tracers at three different spatial scales. *Hydrological Processes*. Vol 22 N. 18 (2008) págs. 3676-3688
6. Blume T., Zehe E., Reuser D., Iroume A., Bronstert A. 2008. Investigation of runoff generation in a pristine, poorly gauged catchment in the Chilean Andes I: A multi-method experimental study. *Hydrological Processes* 22 (2008) p. 3661-3675.
7. Bucker A., Crespo P., Frede H., Vaché K., Cisneros F., Breuer L. 2010. Identifying Controls on Water Chemistry of Tropical Cloud Forest Catchments: Combining Descriptive Approaches and Multivariate Analysis. *AquatGeochem* 16 (2010) p. 127-149.
8. Buytaert W., Iñiguez V., Bievre B. 2007. The effects of afforestation and cultivation on water yield in the Andean páramo. *Forest Ecology and Management* 251 (2007) págs. 22-30.
9. Caballero Y., Jomelli V., Chevallier P., Ribstein P. Hydrological characteristics of slope deposits in high tropical mountains (Cordillera Real, Bolivia). *Catena* 47 (2002) págs. 101-116.
10. Cadol D., Kampf S., Wohl E. 2012. Effects of evapotranspiration on baseflow in a tropical headwater catchment. *Journal Of Hydrology* 462-463 (2012) págs. 4-14.
11. Celleri R., Feyn J. 2009. The Hydrology of Tropical Andean Ecosystems: Importance, Knowledge Status, and Perspectives. *Mountain Research and Development* Vol 29 N. 4 (2009) págs. 350-355.
12. Clark M., Rupp D., Woods R., Tromp-Van H., Peters N. 2009. Consistency between hydrological models and field observations: linking processes at the hillslope scale to hydrological responses at the watershed scale. *Hydrological Processes* 23 (2009) págs. 311-319.
13. Crespo J., Feyen J., Buytaert W., Bucker A., Breuer L., Frede H., Ramirez M. 2011. Identifying controls of the rainfall-runoff response of small catchments in the tropical Andes Ecuador. *Journal of Hydrology* 407 (2011) págs. 164-174.
14. Crespo P., Feyen J., Buytaert W., Celleri R., Frede H., Ramirez M., Breuer L. 2012. Development of a conceptual model of the hydrologic response of tropical Andean micro-catchments in Southern Ecuador. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions* 9 (2012) págs. 2475-2510.
15. Diaz E, Paz L. 2002. Evaluación del Régimen de Humedad del Suelo Bajo Diferentes Usos, en los Páramos Las Animas (Municipio de Silvia) y Piedra de León (Municipio de Sotará ), Departamento del Cauca. Proyecto de grado de Maestría. Popayán, Colombia: Fundación Universitaria de Popayán.
16. Elsenbeer H., Lack A. 1996. Hydrometric and hydrochemical evidence for fast flowpaths at La Cuenca, western Amazonia. *Journal of Hydrology* 180 p 237-250.
17. ESRI (Environmental Systems Research Institute). 1992. *ARC/INFO 6E1 user's guide*. Redlands, CA.
18. Fenicia F., Kavetski D., Savenije H. 2011. Elements of a flexible approach for conceptual hydrological modeling: 1. Motivation and theoretical development. *Water Resources Research* 47 (2011) W11510.
19. Fleischbein K., Wilcke W., Valarezo C., Zech W., Knoblich K. 2006. Water budgets of three small catchments under montane forest in Ecuador: experimental and modeling approach. *Hydrological Processes* 20 (2006) págs. 2491-2507.
20. Giambelluca TW, DeLay JK, Nullet MA, Scholl MA, Gingerich SB. 2011. Canopy water balance of windward and leeward Hawaiian cloud forests on Haleakala, Maui, Hawaii. *Hydrological Processes* 25 (2011) págs. 438-447.



21. Giraldo J., Díaz-Granados M., Camacho L. 2005. Modelo distribuido de tránsito de crecientes en cuencas. Avances en recursos Hidráulicos., 12, p 91-101
22. Goller, R., Wilcke, W., Leng, M. J., Tobschall, H. J., Wagner, K., Valarezo, C., and Zech, W. 2005. Tracing water paths through small catchments under a tropical montane rain forest in south Ecuador by an oxygen isotope approach, *J. Hydrol.*, 308,(2005) págs. 67-80.
23. Holscher D., Kohler L., Van Dijk A., Bruijnzeel L. 2004. The importance of epiphytes to total rainfall interception by a tropical montane rain forest in Costa Rica. *Journal of Hydrology* 292 (2004) págs. 308-322
24. Instituto De Hidrología, Meteorología Y Estudios Ambientales. IDEAM. 2004 Valores de precipitación, caudal y sedimentos Cuenca río Las Ceibas. Sistema de Información Nacional Ambiental.
25. Kendall, C., McDonnell, J 2006 *Isotope Tracers in Catchment Hydrology*. Elsevier, Amsterdam, 570 p.
26. Kinner DA, Stallard RF. 2004. Identifying storm flow pathways in a rainforest catchment using Hydrological and Geochemical modelling. *Hydrologic Processes* 18 (2004) págs. 2851-2875.
27. Leavesley G, Markstrom S., Restrepo P., Viger R. 2002. A modular approach to addressing model design, scale and parameter estimation issues in distributed hydrological modelling. *Hydrological Processes* 16 (2002) págs. 173-187.
28. McDonnell J. J., K. McGuire, P. Aggarwal, K. J. Beven, D. Biondi, G. Destouni, S. Dunn, A. James, J. Kirchner, P. Kraft, S. Lyon, P. Maloszewski, B. Newman, L. Pfister, A. Rinaldo, A. Rodhe, T. Sayama, J. Seibert, K. Solomon, C. Soulsby, M. Stewart, D. Tetzlaff, C. Tobin, P. Troch, M. Weiler, A. Western, A. Worman and S. Wrede. 2010. How old is streamwater? Open questions in catchment transit time conceptualization, modelling and analysis. *Hydrological Processes* 24 (2010) págs. 1745-1754
29. McGuire K., McDonnell J. 2006. A review and evaluation of catchment transit time modeling. *Journal of Hydrology*. 330 p 543-563.
30. Melching CS. 1995. Reliability estimation. In *Computer Models of Watershed Hydrology*, Singh VP (ed.). Water Resources Publication: 69-118.
31. Molina a., Govers G, Vanacker V., Poesen J., Zeelmaekers E., Cisneros F. 2007. Runoff generation in a degraded Andean ecosystem: Interaction of vegetation cover and land use. *Catena* 71 (2007) págs. 357-370.
32. COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Decreto 1640 de agosto 02 de 2012 [Planificación, ordenamiento y manejo de cuencas hidrográficas y acuíferos]. Bogotá, 2012. 28 p
33. Molina A., Vanacker V., Balthazar V., Mora D., Govers G 2012. Complex land cover change, water and sediment yield in a degraded Andean environment. *Journal of Hydrology* 472- 473 (2012) págs. 25-35.
34. Muñoz-Viller. L., McDonnell J. 2013 Land use change effects on runoff generation in a humid tropical montane cloud forest region. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, 10, 5269-5314, 2013
35. Muñoz-Villers L., Holwerda F., Gómez-Cardenas M., Equihua M., Asbjomsen H., Bruijnzeel L., Marín-Castro B., Tobón C. 2012. Water balances of old-growth and regenerating montane cloud forests in the central Veracruz México. *Journal of Hydrology*: 462-463 (2012) p 53-66.
36. Muñoz-Villers L., McDonnell J. 2012. Runoff generation in a steep, tropical montane cloud forest catchment on permeable volcanic substrate. *Water Resources Research* 48 (2012) W095288.
37. Olaya A., Sánchez M. 2003. Ecosistemas Estratégicos del Huila. Significado ecológico y sociocultural. Editorial Universidad Surcolombiana, 353 p.
38. Perrin C., Michel C., Andréassian V. 2001. Does a large number of parameters enhance model performance Comparative assessment of common catchment model structures on 429 catchments. *Journal of Hydrology* 242 (2001) págs. 275-301.
39. Peters NE, Freer J, Aulenbach BT. 2003. Hydrological dynamics of the Panola Mountain Research Watershed, Georgia. *Ground Water* 41 (2003) págs. 973-988.
40. Poulénard J, Podwojewski P, Janeau JL, Collinet J. 2001. Runoff and soil erosion under rainfall simulation of andisols from the Ecuadorian páramo: Effect of tillage and burning. *Catena* 45 (2001) págs. 185-207.

41. Plesca I., Timbe E., Exbrayat J., Windhorst D., Kraft P., Vaché K., Frede H., Breuer L. 2012. Model intercomparison to explore catchment functioning: Results from a remote montane tropical rainforest. *Ecological Modelling* 239 (2012) págs. 3-13.
42. Roa-García, M. C. and Weiler, M.: Integrated response and transit time distributions of watersheds by combining hydrograph separation and long-term transit time modeling. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 14, 1537-1549, doi:10.5194/hess-14-1537-2010, 2010.
43. Rodgers P., Soulsby C., Waldron S., Tetzlaff D. 2005. Using stable isotope tracers to assess hydrological flow paths, residence times and landscape influences in a nested mesoscale catchment. *Hydrology and Earth System Sciences* 9 (2005) págs. 139-155.
44. Rollenbeck R., Bendix J., Fabian P. 2011. Spatial and temporal dynamics of atmospheric water inputs in tropical mountain forests of South Ecuador. *Hydrological Processes* 25 (2011) págs. 344-352.
45. Schawe M, Gerold G, Bach K, Gradstein SR. 2010. Hydrometeorological patterns in relation to montane forest types along an elevational gradient in the Yungas of Bolivia. In *Tropical Montane Cloud Forests. Science for Conservation and Management*, Bruijnzeel LA, Scatena FN, Hamilton LS (eds). Cambridge University Press: Cambridge, UK; págs.199-207.
46. Smith M., Seo D., Koren V., Reed S., Zhang Z., Duan Q., Moreda F., Cong S. 2004 The distributed model intercomparison project (DMIP): motivation and experiment design. *Journal Hydrology* 298 (2004) págs. 4-26
47. Smith M., Koren V., Zhang Z., Zhang Y., Reed S., Cui Z., Moreda F., Cosgrove B., Mizukami N., Anderson E., DMIP 2 participants. Results of the DMIP 2 Oklahoma experiments *Journal of Hydrology* 418-419 (2012) págs. 17-48.
48. Solís M. J. 2003 Paquete interactivo para análisis hidrológico. Tesis Ingeniería Civil. Universidad de las Américas Puebla México. 133 p
49. Toledo-Aceves T., Meave J., González-Espinosa M., Ramírez-Marcial N. Tropical montane cloud forests: Current threats and opportunities for their conservation and sustainable management in Mexico. *Journal of Environmental Management* 92 (2011) págs. 974-981.
50. Tromp-van Meerveld HJ, McDonnell JJ. 2006a. Threshold relations in subsurface stormflow: 1. A 147-storm analysis of the Panola hillslope. *Water Resources Research* 42 (2006)
51. Tromp-van Meerveld HJ, McDonnell JJ. 2006b. Threshold relations in subsurface stormflow: 2. The fill and spill hypothesis. *Water Resources Research* 42: Art. No. W02411.
52. Vaché K., McDonnell J. 2006. A process-based rejectionist framework for evaluating catchment runoff model structure. *Water Resources Research* 42 (2006) W02409.
53. Wallace J., Macfarlane C., McJanet D., Ellis T., Grigg A., Dijk A. 2013. Evaluation of forest interception estimation in the continental scale Australian Resources Assessment Landscape (AWRA-L) model. *Journal of Hydrology* 499 (2013) págs. 210-223.
54. Wilcke W., Gunter S., Alt F., Geibler C., Boy J., Oelmann Y., Weber M., Valarezo C., Mosandl R. 2009. Response of water and nutrient fluxes to improvement fellings in a tropical montane forest in Ecuador. *Forest Ecology and Management* 257 (2009) págs. 1292-1304.
55. Wohl, E., Barros, A., Brunzell, N., Chappell, N.A., Coe, M., Giambelluca, T., Goldsmith, S., Harmon, R.S., Hendrickx, L.M.H., Juvik, J., McDonnell, J., Ogdén, F.L., 2012. A research vision for hydrology in the humid tropics: balancing water, energy, and land use. *Nature Climate Change*. <http://dx.doi.org/10.1038/nclimate1556>.
56. Wullaert H., Pohlert T., Boy J., Valarezo C., Wilke W. 2009. Spatial throughfall heterogeneity in a montane rain forest in Ecuador: Extent, temporal stability and drivers. *Journal of Hydrology* 337 (2009) págs. 71-79.
57. Yang J., Chu X. 2013. Quantification of the spatio-temporal variations in hydrologic connectivity of small-scale topographic surfaces under various rainfall conditions. *Journal of Hydrology* 505 (2013) págs. 65-77.
58. Zimmermann A., Wilcke W., Elsenbeer H. 2007. Spatial and temporal patterns of throughfall quantity and quality in a tropical montane forest in Ecuador. *Journal of Hydrology* 343 (2007) págs. 80-96.
59. Zimmermann B., Elsenbeer H. 2009. The near surface hydrological consequences of disturbance and recovery: A simulation study. *Journal of Hydrology* 364 (2009) págs. 115-127.