

**Universidad de Costa Rica
Facultad de Ciencias Sociales
Escuela de Geografía**

Tesis para optar por el grado de Licenciatura en Geografía

**Uso de trazadores isotópicos, mediciones hidrométricas y modelos matemáticos
para estimar el tiempo de tránsito del agua,
cuenca del río Caño Seco, Coto Brus, Puntarenas, Costa Rica**

Postulantes:

**Carlos Méndez Blanco A73959
María José Molina Montero A93917**

**San José, Costa Rica
Julio, 2016**

Este trabajo final de graduación, en su modalidad de Investigación Dirigida fue aprobado por el Tribunal Examinador, como requisito para optar por el grado académico de Licenciatura en Geografía.

Dra. Isabel Avendaño Flores
Presidenta del Tribunal Examinador

Dr. Hugo Hidalgo León
Lector externo del Tribunal Examinador
(Representante de la Escuela de Geografía)

Dr. Christian Birkel
Director del Comité Asesor

Dr. Rafael Arce Mesén
Lector del Comité Asesor

Dr. Víctor Cortés Granados
Lector del Comité Asesor

María José Molina Montero
Sustentante

Carlos Andrés Méndez Blanco
Sustentante

Dedicatoria

A nuestro director de tesis, Dr. Christian Birkel, por su esfuerzo y dedicación, porque gracias a él logramos concluir este periodo con éxito.

También a nuestros profesores, Dr. Rafael Arce Mesén, Dr. Víctor Cortés, y al Dr. William Zúñiga, por sus consejos y soporte durante todo el proceso de desarrollo de la tesis.

A la universidad de Aberdeen, por financiar el análisis de las muestras de agua.

Y a nuestros profesores en la escuela de Geografía, quienes han dado aportes enormes a nuestro proceso de formación durante estos años.

Agradecimientos

María José Molina

A mis padres, porque todo lo que soy se lo debo a ellos, por siempre motivarme y apoyarme en cada meta que me propongo en la vida.

Carlos Méndez

A mi familia, por el apoyo incondicional que me brindaron, a mis amigos y colegas de carrera por la motivación y apoyo constante, y especialmente a María José por toda la paciencia y los consejos brindados.

Resumen

Cita completa: Méndez C. y Molina M. (2015). “Uso de trazadores isotópicos, mediciones hidrométricas y modelos matemáticos para estimar el tiempo de tránsito del agua, cuenca del río Caño Seco, Coto Brus, Puntarenas, Costa Rica”. Trabajo Final de Graduación en modalidad de Investigación dirigida para optar por el grado de licenciatura en Geografía. Escuela de Geografía. Facultad de Ciencias Sociales. Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica.

Resumen

Para comprender los procesos hidrológicos en las cuencas, las aplicaciones con trazadores isotópicos han sido muy útiles en términos de proporcionar nuevos conocimientos. El tiempo de tránsito (TT) del agua permite comprender la capacidad de almacenamiento de un acuífero, estimar tasas y velocidades de escorrentía superficial y subterránea, lo cual tiene distintas aplicaciones, una de ellas es la determinación del tiempo de estadía de contaminantes dentro de la cuenca; además, puede determinar la cantidad máxima de agua que puede ser aprovechada para consumo humano, riego o actividades industriales, sin afectar la dinámica hídrica de la cuenca.

De tal manera, este estudio tuvo como objetivo estimar el TT del agua en la cuenca del río Caño Seco (30 km²), Pacífico Sur, usando los isótopos estables del agua $\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$. El TT se calcula por medio de un modelo matemático usando series de tiempo del volumen de lluvia y de $\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$ recolectado diariamente en la lluvia y las aguas del río por más de dos años (de agosto del 2012 a agosto del 2014). En una segunda fase se relaciona el TT con variables climáticas (evapotranspiración, temperatura, humedad relativa, presión barométrica, radiación solar, velocidad y dirección de viento), para comprender mejor su origen y las posibles implicaciones de esto en términos de la calidad de agua.

El principal hallazgo de esta investigación es que el TT es variable en el tiempo. Los resultados muestran dos periodos interanuales muy contrastados, los cuales están determinados por la variabilidad climática y el origen de la humedad generadora de las lluvias en la cuenca. El primer periodo va de agosto del 2012 a mayo del 2013, con

lluvias inferiores al promedio y con tasas de evapotranspiración elevadas. Este periodo se caracteriza por un TT promedio de 295 días, al contrario del segundo periodo, con un TT promedio de solo 10 días.

El segundo periodo se identificó entre junio del 2013 y agosto del 2014 y mostró una mayor precipitación, lo cual se ve reflejado en un TT inferior, comparado con el primer periodo. Además de la marcada diferencia interanual, es posible distinguir una variabilidad intraanual marcada por la estacionalidad climática. Se obtuvo un TT promedio de 185 días para el periodo seco y 15 días en el periodo más lluvioso, demostrando así que el tiempo de tránsito no es uniforme en el tiempo, al igual que la permanencia de potenciales contaminantes en la cuenca.

A pesar de la importancia del momento cuando en el calendario climático sucede una contaminación, la principal repercusión de los TT altos, es que posiblemente prolonga el tiempo de permanencia de un contaminante natural o antrópico en la cuenca y así pone en peligro la calidad de agua para uso humano, industrial y agrícola. Ello le otorga gran relevancia a este estudio, como insumo para la creación de planes de manejo que contemplen el TT como una de las principales variables por tomar en cuenta en la zonificación de usos de la tierra, por mencionar un ejemplo, o en la protección de zonas de recarga vulnerables. Además, se plantean lineamientos para el manejo del recurso hídrico, planes reguladores y ordenamiento territorial.

Palabras Clave: Cuenca, agua, hidrogeografía, isotopos estables, deuterio, oxígeno-18, tiempo de tránsito, calidad del agua, planes de manejo del recurso hídrico.

Contenido

Índice de figuras	x
Índice de tablas	xii
Abreviaturas	xiii
1. Capítulo primero: Fundamentación de la investigación.....	1
1.1. Problema	2
1.2. Justificación.....	4
1.3. Antecedentes	10
1.4. Objetivos.....	16
1.4.1. General:	16
1.4.2. Específicos:	16
1.5. Marco teórico: introducción a la temática de la investigación.....	17
1.5.1. Fundamentos isotópicos para estudios hidrogeoquímicos	18
1.5.2. Trazadores isotópicos en cuencas hidrográficas.....	25
1.5.3. Modelos para la estimación del tiempo del tránsito del agua.....	28
1.6. Marco metodológico	34
1.6.1. Variables de la geografía física de la cuenca del río Caño Seco	36
1.6.2. Componente hidrometeorológicos de la cuenca del río Caño Seco	43
1.6.3. Componentes biofísicos de la cuenca del río Caño Seco	47
1.6.4. Variables isotópicas.....	51
1.6.5. Recolección de muestras de agua para la obtención de información de concentraciones isotópicas	52
1.6.6. Modelo matemático para estimar el tiempo de tránsito del agua en la cuenca	53
1.6.7. Línea meteórica	55
1.6.8. Estandarización y tabulación de los datos de entrada	56
1.6.9. Calibración del modelo	56
2. Capítulo segundo: Monitoreo hidrometeorológico e isotópico.....	59
2.1. Caracterización del área de estudio	59

2.1.1. Características morfométricas de la cuenca	60
2.1.2 Características climáticas	66
2.1.3 Caracterización de la geografía física	69
2.2. Características isotópicas de la cuenca del río Caño Seco	81
2.2.1. Variaciones temporales de las concentraciones isotópicas ($\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$) en precipitación y caudal.....	81
2.2.2. Línea meteórica	84
2.2.3. Modelo matemático para estimar el tiempo de tránsito del agua	90
2.2.4. Comparación del tiempo de tránsito de $\delta^2\text{H}$ en relación con el $\delta^{18}\text{O}$	95
2.2.5. Parámetros alfa-beta y rendimiento del modelo en la estimación del tiempo de tránsito del agua	97
3. Capítulo tercero: Conclusiones y recomendaciones para un mejor manejo del recurso hídrico en la cuenca del río Caño Seco	100
4. Bibliografía.....	109
5. Anexos.....	118

Índice de figuras

Figura 1. Isótopos de hidrógeno. Fuente: Glosarios servidor Alicante, 2013.....	21
Figura 2. Transformación de una entrada variable en una salida más constante, por procesos hidrológicos complejos en una cuenca la cual va a condicionar la distribución y normalización del tiempo de tránsito, como concepto básico del modelo matemático por aplicar. Modificado según McGuire y McDonnell, (2006).....	30
Figura 3. Clasificación de una cuenca según la curva hipsométrica. Fuente: Llamas, (1993).	
Figura 4. Diagrama que representa el proceso de estimación de la evapotranspiración potencial por el método de Hargreaves.	
Figura 5. Aforo y técnica de recolección del agua en el cauce del río Caño Seco.....	52
Figura 6. Gráfica de la curva hipsométrica y frecuencia de altitudes para la cuenca del río Caño Seco. Elaborado por Méndez y Molina, (2015).....	65
Figura 7. Comportamiento de la evapotranspiración potencial y la precipitación mensual para el área de estudio de enero del 2012 a diciembre del 2014. Elaborado por Méndez y Molina, (2015).	
Figura 8. Presencia de andisoles, con uso agrícola, en la cuenca del río Caño Seco. Elaborado por Méndez y Molina, (2015).	
Figura 9. Presencia de ultisoles, en la cuenca del río Caño Seco. Elaborado por Méndez y Molina, (2015).	72
Figura 10. Evidencia de la presencia de meandros de altura en el río, producto de la acumulación de sedimentos y la disminución de la capacidad de arrastre del río ante el descenso de la pendiente del cauce. Elaborado por Méndez y Molina, (2015).....	80
Figura 11 Se muestran $\delta^{2}H$ en la precipitación y en el caudal desde septiembre del 2012 hasta abril del 2014. Elaborado por Méndez y Molina, (2015).....	83
Figura 12 Se muestran $\delta^{18}O$ en el caudal del río Caño Seco, desde setiembre del 2012 hasta abril del 2014. Elaborado por Méndez y Molina, (2015).	
Figura 13 Línea meteórica local para la cuenca del río Caño Seco, periodo de estudio 05/2012 al 08/2014, n=471. Elaboración: Méndez y Molina, (2015).	
Figura 14 Transformación de una entrada variable (concentraciones de $\delta^{2}H$ en la precipitación) en una salida más constante (tiempo de tránsito), debido a procesos hidrológicos complejos en una cuenca, como concepto básico del modelo matemático gamma, para un periodo de 4 meses. Elaboración: Méndez y Molina, (2015).	91

Figura 15 Tiempo de tránsito calculado con diferentes periodos para fines de comparación. Periodo 2012-2014. Elaborado por Méndez y Molina, (2015).....	92
Figura 16 La figura muestra la dinámica de las lluvias y la evapotranspiración en relación con el TT por periodos de cuatro meses de agosto del 2012 hasta setiembre del 2014. Elaborado por Méndez y Molina, (2015).	94
Figura 17 Relación entre la dirección del viento y el tiempo de tránsito, con un nivel de correlación alto. Elaborado por Méndez y Molina, (2015).	95
Figura 18 Se observa la variabilidad interanual e intraanual que existe del $\delta^{2}H$ y del $\delta^{18}O$. Elaborado por Méndez y Molina, (2015).....	96
Figura 19 Parámetros α y β utilizados para la estimación del tiempo de tránsito con el isótopo $\delta^{2}H$ en la cuenca del río Caño Seco. Elaborado por Méndez y Molina, (2015).97	
Figura 20 Distancia euclidiana utilizada para evaluar la eficiencia del modelo. Elaborado por Méndez y Molina, (2015).	99

Índice de mapas

Mapa 1. Ubicación del área de estudio. Elaborado por Méndez y Molina, (2015).....	7
Mapa 2. Clasificación de pendientes en porcentaje para la cuenca del río Caño Seco. Elaborado por Méndez y Molina, (2015).	62
Mapa 3. Clasificación de la cobertura de la tierra, con base en una imagen satelital RapidEye 2014, con una resolución de 2 m de píxel. Elaborado por Méndez y Molina, (2015)..	70
Mapa 4. Clasificación de los tipos de suelo dentro de la cuenca del río Caño Seco. Elaborado por Méndez y Molina, (2015)..	73
Mapa 5 Clasificación de la geología y geomorfología de la cuenca alta del Río Caño Seco. Elaborado por: Méndez y Molina, (2015).	75
Mapa 6. Clasificación de la geología y geomorfología de la cuenca del río Caño Seco. Elaborado por Méndez y Molina, (2015)..	75
Mapa 7. Índice Topográfico de Humedad de la cuenca alta del río Caño Seco. Elaborado por Méndez y Molina, (2015)..	79
Mapa 8. Distribución espacial del $\delta^{2}H$ (‰) para Costa Rica, respecto a 49 estaciones de control (anexo 2). Elaboración: Méndez y Molina, (2015)..	88
Mapa 9. Distribución espacial del $\delta^{18}O$ (‰) para Costa Rica, respecto a 49 estaciones de control (anexo 2). Elaborado por Méndez y Molina, (2015)..	89

Índice de tablas

Tabla 1. Principales características de isótopos naturales para el uso como trazador. Fuente: Moser y Rauert, 1980.	26
Tabla 2. Tiempo de tránsito de distribución del agua para cuencas hidrográficas. Fuente: McDonnell, J. McGuire, K. Aggarwal, P. Beven, J., Biondi, D., Destouni, G., Dunn, S., James, A., Kirchner, J., Kraft, P. Lyon, S., Maloszewski, P., Newman, B., Pfister, L., Rinaldo, A., Rodhe, A., Sayama, T., Seiber, J., Solomon, K., Soulsby, C., Stewart, M., Tetzlaff, D., Tobin, C., Troch, P., Weiler, M., Western, Worman, A., Wrede, S., (2010).....	32
Tabla 3. Parámetros calculados para estimar las características morfométricas de la cuenca del río Caño Seco. Elaborado por Méndez y Molina, (2016).....	37
Tabla 4. Clasificación de una cuenca según su tamaño. Fuente: Villón, (2004).....	38
Tabla 5 Clasificación de la cuenca, según valores del factor de forma. Fuente: Delgadillo y Moreno, (2009).....	39
Tabla 6 Clasificación de la forma de una cuenca, según los valores del índice de compacidad de Gravelius. Fuente: Villón, (2004).....	39
Tabla 7. Clasificación porcentual de las pendientes. Fuente: MAG.	40
Tabla 8. Clasificación de la pendiente del cauce principal de una cuenca. Fuente: Anaya, (2012).....	41
Tabla 9 Clasificación de la densidad de drenaje de una cuenca. Fuente: Villón, (2004).	42
Tabla 10. Variables climáticas por periodos de tiempo de seis meses en la cuenca del río Caño Seco. Elaborado por Méndez y Molina, (2015).....	68
Tabla 11. Estadísticas de las $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$, cuenca del Caño Seco, Costa Rica. 2012-2014. Elaborado por Méndez y Molina, (2015).	82

Índice de modelos conceptuales

Modelo conceptual 1. Para estimar e interpretar el tiempo de tránsito es requerido tomar en cuenta variables, tanto de la geografía física como isotópicas, específicamente las $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$	35
Modelo conceptual 2. Flujo de trabajo para el procesamiento de imágenes satelitales	48

Abreviaturas

DTT: Distribución del Tiempo de Tránsito

FAO: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación

Ff: Factor de forma

$\delta^2\text{H}$: Deuterio

ITH: Índice de Humedad Topográfica

Kc: Coeficiente de compacidad

LMCR: Línea meteórica para Costa Rica

LML: Línea meteórica local

LMM: Línea meteórica mundial

MTT: Media del tiempo de tránsito

$\delta^{18}\text{O}$: Oxígeno -18

OIEA: Organización Internacional de Energía Atómica

ONU: Organización de las Naciones Unidas

TT: Tiempo de tránsito

VSMOW: *Vienna Standard Mean Ocean Water*

1. Capítulo primero: Fundamentación de la investigación

En la actualidad, el agua es un recurso que tiene cada vez más relevancia en estudios técnicos, científicos y sociales. La mayoría de esos estudios se llevan a cabo en las cuencas hidrográficas, como unidades geográficas, y en muchos casos no se conocen las características relacionadas con la hidrodinámica (que se entiende para efectos de esta investigación como el análisis del tiempo de tránsito del agua) y las condiciones climáticas de esas cuencas, así como de los acuíferos y zonas de recarga de dichas unidades. Cada vez es más pertinente desarrollar estudios que permitan no solo conocer las diferentes dinámicas en el ciclo hidrológico, sino que también posean un carácter científico que provea de insumos a los planes de manejo del recurso hídrico y, por tanto, su aprovechamiento responsable y preservación.

De todos los métodos utilizados para comprender los procesos hidrológicos en cuencas pequeñas, las aplicaciones con trazadores (en particular los trazadores isotópicos) han sido muy útiles en términos de proporcionar nuevos conocimientos sobre los procesos hidrológicos. Esto se debe a que, entre otras cosas, las técnicas isotópicas pueden ayudar a determinar los orígenes y edades de los diferentes cuerpos de agua, proporcionar una estimación del grado de mezcla, determinar la ubicación y la proporción de la recarga de agua, e indicar la velocidad del flujo de agua subterránea.

Este estudio tiene como objetivo estimar, con la ayuda de un modelo matemático, el tiempo de tránsito del agua en la cuenca del río Caño Seco. El tiempo de tránsito se refiere a la edad del agua en el momento en que abandona el sistema, desde el momento en que cae hasta que sale de ella. La historia o la vida del agua en diferentes partes del ciclo hidrológico se puede seguir mediante la abundancia de los isótopos estables del agua: $\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$. De esta manera, el agua desarrolla en diferentes entornos “huellas dactilares” isotópicas con las que se pueden identificar y rastrear sus orígenes, flujos o dinámicas. Dicho conocimiento permite a los profesionales en geociencias desarrollar modelos de gestión del agua y se pueden formular las estrategias para el desarrollo sostenible.

El tiempo de tránsito del agua tiene la particularidad de que no es constante temporalmente, es decir, en una cuenca este tiempo no es siempre el mismo en todo momento. Sin embargo, muchos estudios en el pasado usaron el tiempo de tránsito medio como un parámetro físico invariable en el tiempo, que sirve para caracterizar una cuenca y para la comparación entre varias cuencas diferentes. Por ello, en esta investigación se plantea realizar un análisis más detallado y realista de dicho fenómeno, identificando así los cambios en el comportamiento del tiempo de tránsito y su medio, en distintos periodos. El análisis se enfoca especialmente en la época lluviosa y la época seca, que se diferencian de manera notoria en la zona de estudio.

Del mismo modo y de manera innovadora, el análisis de los datos obtenidos en el modelo será correlacionado con los aspectos geográficos (geomorfología, geología, uso de la tierra, clima, suelos, entre otros) de la zona. Con esto, se obtendrán datos que vislumbren, en mayor medida, el porqué del comportamiento del tiempo de tránsito y, sobre todo, se obtendrá una noción más realista de las dinámicas hidrológicas y su vínculo con el contexto natural y antrópico en el que se generan.

1.1. Problema

En los últimos años se han presentado, con mayor frecuencia y con una creciente severidad, problemas relacionados con el agua en diferentes zonas del país y la cuenca del río Caño Seco no escapa de esta realidad. Estos problemas son el resultado de un cúmulo de factores antropogénicos y naturales, que van desde la irregularidad en la distribución de la precipitación, la heterogeneidad espacial en la ubicación de acuíferos y otras fuentes hídricas, así como el desarrollo de grandes concentraciones humanas, núcleos industriales y agrícolas en regiones deficitarias en agua, además de la contaminación de ríos, lagos y acuíferos.

Por estas razones, se ha incrementado la preocupación por definir y poner en práctica políticas dirigidas a conocer mejor los recursos disponibles, prevenir el deterioro de las fuentes de agua y optimizar su uso.

La cuenca del río Caño Seco, en Coto Brus, se encuentra en una de las regiones con un régimen de lluvias de los más severos del país. Sin embargo, el almacenamiento y aprovechamiento del agua no es tan efectivo como se podría desear. Esto se debe a que, en primer lugar, en la cuenca del río Caño Seco sobresale la formación de un sistema lacustre antiguo, el cual propició el desarrollo de un relleno sedimentario fluvial y la conformación de un altiplano en la zona.

Ello permite encontrar, hoy en día, en algunos sectores, meandros de altura y formaciones de colinas convexas, denominadas también como “medias naranjas”, debido a que el agua no tiene la suficiente capacidad de arrastre en esas áreas planas. Esto origina que los limos y arcillas erosionados en las laderas de estas medias naranjas se depositen y mezclen con materia orgánica en los fondos de valle consolidándose en una amalgama semiimpermeable, que dificulta la infiltración de agua en algunos sectores de la cuenca y, por tanto, la recarga efectiva de los acuíferos.

La poca capacidad de infiltración en ciertos sectores, asociada con las condiciones agroecológicas imperantes en la cuenca, facilitan enormemente la formación de escorrentía superficial en muy corto tiempo, por lo que los cauces poseen un tiempo de respuesta relativamente corto. Ante ello, se presentan, en eventos máximos de lluvia, pequeñas inundaciones en zonas cercanas a la comunidad de Copa Buena y Agua Buena, situación que es recalcada por Morales y Liberoff (2013), quienes catalogan a la comunidad de Agua Buena como uno de los asentamientos que pueden verse afectados o poseen un alto riesgo ante inundaciones o avalanchas, en este caso asociadas al río Agua Buena, afluente del río Caño Seco.

Anudado a lo anterior y a las características hidrogeológicas, se puede hablar de una baja capacidad de almacenamiento en la cuenca. Geológicamente, gran parte de la cuenca se ubica sobre la formación Térraba, conformada por arenisca y lutitas con baja capacidad de retención de agua. Todo esto afecta a varias poblaciones, como las comunidades de Pilares y Villa Romo, que en la época seca no cuentan con suficiente agua o deben costear pozos a grandes profundidades, los cuales tienen muy baja capacidad extractiva y conducen a un serio problema en cuanto a la calidad, distribución y acceso al agua.

Del mismo modo, la actividad antropogénica agrava significativamente la situación del recurso en la cuenca. No se posee un estudio sobre las condiciones hidroclimáticas de la cuenca que ayuden a comprender la dinámica hídrica y, aunque en el pasado se han realizado estudios, los datos recopilados no son representativos o carecen de una continuidad que permita un correcto análisis de la situación y los procesos hidrodinámicos imperantes.

Es importante conocer las variables que determinan la calidad y distribución del agua. A su vez, deben impulsarse estudios que ayuden a obtener e implementar mejores políticas de protección del recurso hídrico. Ante ello, se plantea la necesidad de investigar: ¿Cómo se comporta el tiempo de tránsito del agua a diferentes escalas temporales y qué características propias de la cuenca influyen en esos intervalos?

1.2. Justificación

Desde hace un par de décadas, los estudios relacionados con problemas hidrológicos y todo lo que concierne al agua como recurso primordial para la vida, se han ido incrementando paulatinamente, debido a que el manejo adecuado y la gestión del recurso hídrico, bajo estrategias de planificación bien alineadas desde su concepción hasta su impacto en la implementación, pueden permitir revertir los riesgos sobre la salud y el bienestar del ser humano, la seguridad alimentaria, el desarrollo industrial y la calidad de los ecosistemas.

De lo contrario, continuarían las manifestaciones de escasez, uso y manejo inadecuado, para ubicarse como uno de los factores de mayor limitación para el desarrollo sostenible a escala mundial (Guzmán, 2007). Ante ello, se requieren datos y análisis que permitan desarrollar estos planes de manejo, por lo cual son de gran utilidad los estudios del tiempo de tránsito del agua en una cuenca, lo que le da gran relevancia a la presente investigación.

La cuenca es una unidad geográfica de estudio, cuyo territorio es drenado por una única red de drenaje. Entre las ventajas que posee la unidad cuenca, está el hecho de que ostenta una delimitación natural. Cada cuenca posee características que las diferencian de las unidades vecinas y, al tener una sola salida donde convergen las

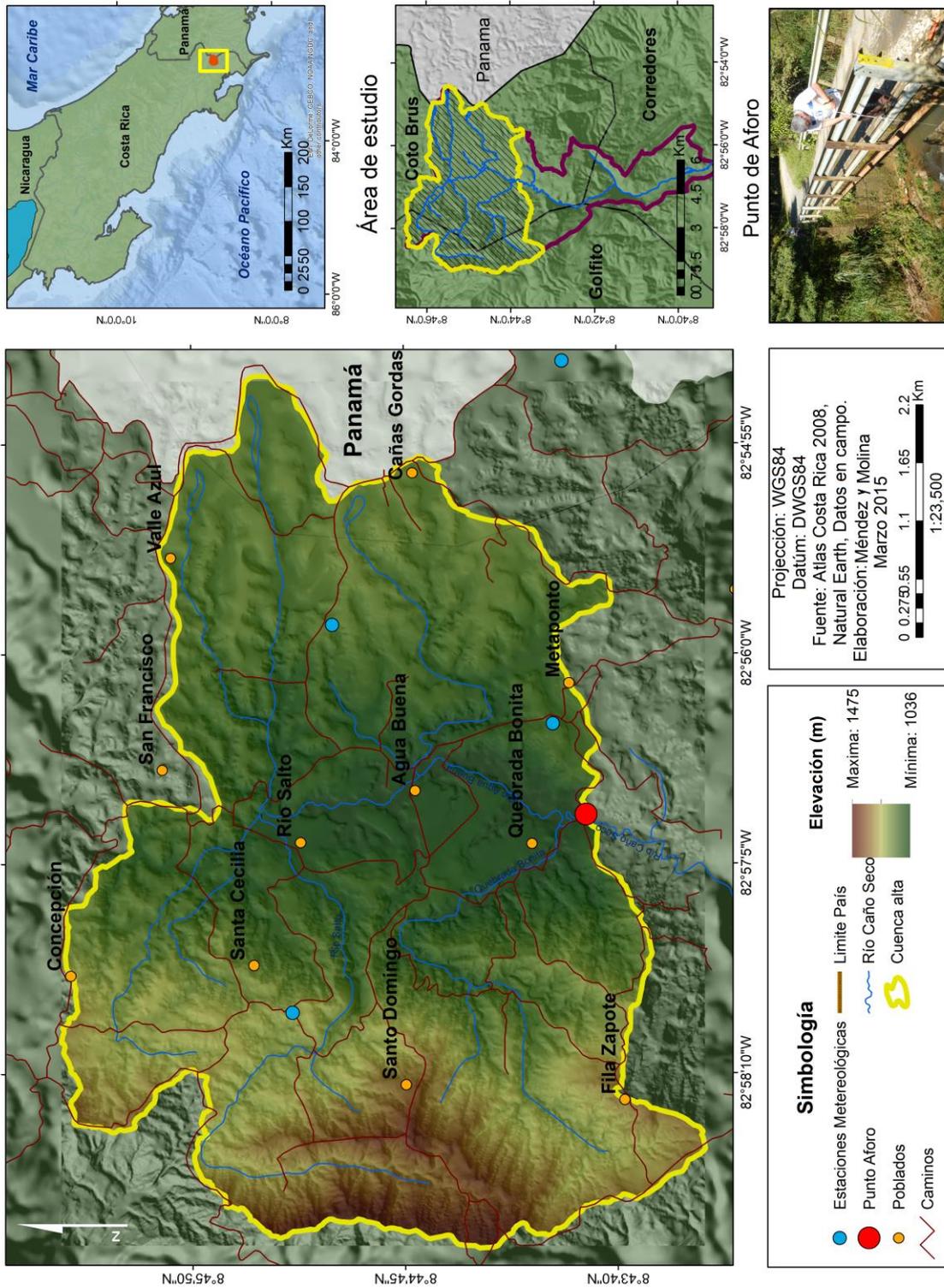
aguas, eso facilita los estudios hidrológicos, tal como lo exige el estudio del tiempo de tránsito. La cuenca hidrográfica es de interés, no solo por la importancia que tiene el agua por sí misma, sino también por su interrelación con otros recursos, tales como bosques, suelos y fauna, entre otros; desde la cuenca, el agua interactúa con todos esos elementos. El estudio del tiempo de tránsito del agua no solo ayuda a tener una comprensión global de la dinámica de la cuenca desde la perspectiva hídrica, sino que además aporta insumos importantes para realizar planes de gestión que garanticen la mejora de la calidad de este recurso.

La cuenca del río Caño Seco, como unidad de estudio, fue seleccionada debido a las condiciones naturales que posee, que la hacen única e interesante para analizar. Por ejemplo, la cuenca está dividida, en términos geomorfológicos, en dos sectores (*mapa 1*), uno con un relieve abrupto típico de las cuencas altas y otro sector con características propias de un altiplano, con colinas convexas en forma de medias naranjas, pendientes suaves y presencia de meandros. A la vez, la cuenca se caracteriza por abundantes lluvias casi todo el año (3200 mm promedio anual); sin embargo, debido al tipo de unidades geológicas existentes (formación Terraba: lutitas y areniscas, formación Brito: calizas) no son almacenadas de manera eficiente.

La cuenca del Río Caño Seco ha estado dentro de los proyectos de investigación VI-B2235: *Análisis hidrometeorológico y geomorfológico en microcuencas hidrográficas de Costa Rica*, y 217-B4-239: *Hidrología isotópica tropical con aplicaciones en Costa Rica*, vinculados a la Escuela de Geografía de la Universidad de Costa Rica.

El primer proyecto fue realizado en el distrito Agua Buena, en Coto Brus, tal como se muestra en el *mapa 1* y fue ejecutado entre el año 2010 y el año 2014. Durante este periodo se recolectaron datos climatológicos e hidrológicos, que serán procesados para utilizarse en distintas investigaciones. Estos datos representan por sí mismos un avance significativo en cuanto a la recolección de información de campo y que, por su continuidad, favorecen de forma positiva los estudios de este tipo. Por otro lado, no se puede dejar de lado las características físicas de la cuenca como su topografía, geología, hidrología, clima y la parte humana, conformada principalmente por el uso actual de la tierra y las repercusiones en sus dinámicas hídricas.

Respecto a la importancia social de esta investigación, resalta el aporte científico de investigaciones hidrológicas, como la respuesta de la cuenca ante fuertes precipitaciones y posibles inundaciones aguas abajo (como ha sucedido en Ciudad Neily en el pasado). A su vez, permite obtener información valiosa para la elaboración de planes de manejo de la cuenca y el fomento de la economía de la misma, con mejores técnicas de conservación del agua., Mediante la protección de las zonas de recarga y el conocimiento de los tiempos de tránsito del agua, se realizan simulaciones de posibles problemas de contaminación hídrica y su efecto directo en las fuentes de agua y actividades antrópicas en la cuenca.



Mapa 1. Ubicación del área de estudio. Elaborado por Méndez y Molina, 2015.

Las técnicas isotópicas ambientales se basan en las variaciones que experimentan el isótopo estable y el contenido radio isotópico de las aguas naturales.

Los isótopos ambientales $\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$ forman parte de la molécula de agua y son, por lo tanto, trazadores casi ideales para el agua. Es por esta razón que se decidió utilizar este tipo de trazadores en la presente investigación. Birkel, C., Tetzlaff, D., Dunn, S. Y Soulsby C. (2011) refieren que dichos marcadores han demostrado ser herramientas fiables para entender los procesos físicos de cómo se almacena agua, se mezcla y cómo se genera escurrimiento en sistemas de captación, dando mayor respaldo a la utilización de los isótopos mencionados. A la vez, mediante la abundancia de los isótopos pesados estables de hidrógeno $\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$, se puede seguir la historia o la vida del agua en diferentes partes del ciclo hidrológico. Esto se debe a que el agua, en diferentes entornos, desarrolla “huellas dactilares” isotópicas con las que se pueden identificar y rastrear sus orígenes. Sin embargo, la distribución de estos tiempos de viaje se supone que reflejan todo el espectro de edades del agua y las posibles rutas del flujo y se ha demostrado que varían significativamente entre diferentes cuencas (Birkel et al. 2011). Eso es lo que se pretende demostrar en esta investigación.

Los resultados obtenidos con este tipo de simulaciones tienen la particularidad de que no son constantes temporalmente, es decir, el tiempo de tránsito o edad del agua en una cuenca no es la misma todo el tiempo; sin embargo, los diferentes estudios que se han realizado toman la edad obtenida en las simulaciones como una variable estándar para toda la serie de tiempo y la zona de estudio. En esta investigación se pretende llegar más allá y realizar un desglose de la línea de tiempo que permita identificar los cambios en diferentes momentos, específicamente en época lluviosa y época seca, para de esta manera tener una estimación del tiempo de tránsito del agua en momentos y contextos, lo cual resulta muy novedoso a nivel científico en este tipo de trabajos.

Este estudio sobre el tiempo de tránsito del agua trae consigo muchos beneficios para las comunidades vecinas a la zona de interés y para posibles investigaciones futuras en torno a esta temática ya que, por ejemplo, se pueden brindar recomendaciones para:

- a) Determinar las zonas y velocidad de recarga, lo cual ayuda a determinar las áreas que deben ser protegidas, para la preservación de las fuentes de aguas superficiales y subterráneas.

- b) Estimar tasas y velocidades de escorrentía superficial y subterránea, lo cual ayuda en casos de contaminación de los mantos acuíferos y el tiempo que permanecerán esos contaminantes ahí.
- c) Determinar la movilidad de la escorrentía (hacia dónde se mueve el agua).
- d) Establecer la capacidad de almacenamiento superficial, lo que ayuda a estimar la cantidad de agua con la que se cuenta y, de esta manera, realizar mejores planes de manejo.
- e) Concretar estudios para riego.
- f) Contribuir a la recuperación del paisaje.
- g) Generar un plan de manejo del agua en la cuenca de estudio.

Es posible establecer que, entre otras cosas, las técnicas de isótopos permiten determinar los orígenes y edades de los diferentes cuerpos de agua, proporcionar una estimación del grado de mezcla, determinar la ubicación y la proporción de la recarga de agua e indicar la velocidad del flujo de agua subterránea. Es así como los hidrólogos pueden desarrollar un modelo de gestión del agua y formular las estrategias para el desarrollo sustentable.

Ya se ha demostrado que los datos de isótopos son útiles para ayudar al desarrollo y evaluación de modelos orientados a los procesos en los que se utilizan trazadores de flujos. Los trazadores de isótopos estables del agua pueden mejorar la comprensión sobre cómo el agua se mueve a través de sistemas de captación y cómo su caracterización resulta adecuada para predecir cómo pueden responder los sistemas a futuros cambios ambientales (Birkel et al. 2011).

Finalmente, cabe señalar que, si bien la cuenca presenta problemas ligados a inundaciones, calidad, cantidad y distribución del agua, la presente investigación no pretende solventar estas cuestiones, ya que no se cuenta con los recursos técnicos ni económicos para ello. Sin embargo, los estudios sobre tiempo de tránsito del agua y el levantamiento de datos climáticos e hidrológicos de la cuenca resultan un insumo importante en la elaboración de un plan de manejo por parte de las instituciones correspondientes, que ayude a mitigar estos problemas en la región.

1.3. Antecedentes

A principios del siglo XIX, se conjeturaba que algunos elementos consistían en mezclas de átomos de diferente peso. La Organización Internacional de Energía Atómica (OIEA), en una breve recopilación histórica, menciona que para 1913 F. Soddy introduce por primera vez el término isótopos en su artículo "*The radioelements and the periodic law*", expresión que empleó para los nucleidos que ocupan la misma posición en la tabla periódica, pero que difieren en sus propiedades nucleares.

Ese mismo año, Thomson (1913), citado por la OIEA, demostró en su artículo "*The appearance of helium and neon in vacuum tubes*" que el elemento neón se compone de más de un isótopo, por lo cual fue el primero en demostrar la existencia de varios isótopos en un mismo elemento. No es sino hasta 1919, con la invención del espectrógrafo de masas Aston's, que el descubrimiento de los isótopos de todos los elementos se puso en marcha de manera más eficaz. Desde entonces, los estudios en los que se emplean las técnicas isotópicas se han diversificado en diferentes ámbitos de la ciencia.

La OIEA empezó a funcionar en Viena, en Julio de 1957. En noviembre de ese año, la Asamblea General de la Organización de Naciones Unidas aprobó un acuerdo sobre la relación entre la OIEA y la ONU, a fin de tratar de acelerar y aumentar la contribución de la energía nuclear para fines de paz, la salud y la prosperidad en todo el mundo. El objetivo era asegurar que la asistencia prestada no se utilice con fines militares. Por eso, la OIEA estableció normas de seguridad nuclear y protección ambiental, de ayuda a los países miembros mediante actividades de cooperación técnica y fomento al intercambio de información científica y técnica sobre la energía nuclear. A partir de 1958, esta organización publica boletines anuales y mensuales referentes a todo lo concerniente a la energía atómica, incluyendo lo relativo a técnicas isotópicas.

De esas publicaciones cabe resaltar el reporte técnico serie n. ° 210, publicado en Viena, en 1981: *Stable Isotope Hydrology: deuterium and oxygen-18 in the water cycle*. En esta publicación se despliega el trasfondo teórico del fraccionamiento de isótopos estables en los procesos físico químicos naturales que involucran agua dulce. Se

exponen, con la ayuda de ejemplos claros, las diferencias isotópicas encontradas en aguas naturales y su utilización para fines hidrológicos prácticos. Se desarrolla desde la historia de las técnicas isotópicas hasta los principales aportes a los estudios hidrológicos, dejando claro muchos conceptos técnicos que deben ser abordados en cualquier investigación de este tipo.

Esa información puede ser complementada por artículos como el presentado por Payne (2001): “*Las técnicas isotópicas en hidrología: instrumentos prácticos para resolver los problemas del agua*”, donde se muestra, de manera sintética, la historia del uso de los isótopos estables en los análisis hidrológicos, las técnicas empleadas y algunos resultados importantes. Este estudio da una idea clara de cuáles son los principales aportes del uso de trazadores isotópicos en diferentes estudios, como aguas llovidas, aguas subterráneas y escorrentía, esencialmente mediante el uso de isótopos de carbón, hidrógeno y oxígeno.

Del mismo modo, existe un sinnúmero de artículos de carácter científico, que pueden aportar conceptos teóricos, ya sea en el campo de la hidrología, de las técnicas isotópicas o de modelos matemáticos, para enriquecer esta investigación.

En Costa Rica, uno de los proyectos pioneros en la utilización de las técnicas isotópicas es el de Gómez y Arredondo (1994), con su trabajo: *Hidrología isotópica del valle del río Tempisque, Guanacaste, Costa Rica*. Para inicios de la década de los 90, en Costa Rica no se contaba con análisis estadísticos de $\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$, razón por la cual Gómez y Arredondo instalaron una red de muestreo que cubriera gran parte del territorio nacional, para iniciar una recolección mensual de muestras de lluvia, con el fin de estimar el rango de variación de los contenidos isotópicos de la precipitación y poder definir una línea meteórica local. Del mismo modo, aprovecharon la existencia de una red nacional de estaciones pluviométricas, escogieron 15 sitios de recolección para el primer año del proyecto, distribuidos en ambas vertientes del país y procuraron que estuvieran a diferentes alturas. Siete de estos puntos de muestreo estaban dentro de la costa Pacífica y la cuenca del río Tempisque. En el segundo año del proyecto, se recolectaron muestras de lluvia de únicamente cinco estaciones, cuatro de las cuales están dentro de la zona del proyecto.

Entre los principales resultados obtenidos en ese estudio, está que se pudo constatar, mediante la medida sistemática de varias estaciones meteorológicas, la composición isotópica de la precipitación, la complejidad espacial y temporal de la distribución de los contenidos de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$, que caracterizan a la zona de estudio en la costa pacífica, así como en el resto de las áreas muestreadas en el país. En varias estaciones se observaron, durante algunos meses, efectos isotópicos de altitud y de distancia a la costa, inversos a los esperados. La utilización de técnicas isotópicas en la margen derecha del río Tempisque permitió confirmar el importante grado de interacción que existe entre las aguas subterráneas y superficiales. La presencia de aguas fuertemente evaporadas en el acuífero indicó la filtración preferencial en algunos sectores de aguas superficiales.

Un segundo estudio realizado en Costa Rica, donde se emplean técnicas isotópicas, es el de Reynolds y Fraile (2009): *Utilización de isótopos estables en la precipitación para determinar zonas de recarga del acuífero Barva*, donde se analizó la composición isotópica ($\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$) de las aguas subterráneas del acuífero Barva y de la precipitación en la zona, con la finalidad de identificar las áreas de recarga y de evaluar los principales procesos hidrológicos e hidrogeológicos. Para ello, se tomaron muestras de pozos, manantiales y precipitación durante al menos 12 meses, en el transcurso del período comprendido entre enero de 2002 y octubre de 2004.

Los resultados de este estudio llevaron a la conclusión de que existen complejas relaciones hidrogeológicas y climáticas en la zona de estudio, determinadas principalmente por la variedad en las cualidades y espesores de los materiales volcánicos y de las interacciones entre los sistemas de viento predominantes en la región.

De igual forma, se concluyó que la recarga del acuífero Barva es local y derivada de la precipitación de procedencia del Pacífico en su parte central y noroeste. Una parte de la recarga ocurre en las tierras altas, ubicadas en la parte noreste y sur de la zona, donde también se recarga el acuífero Colima Superior, semiconfinado. En esta zona se da una influencia importante de la precipitación proveniente del Caribe. Ocurren procesos intensos de reciclaje de humedad por evapotranspiración y reevaporación de la humedad, interceptada por la vegetación en la parte alta del

acuífero, en las cercanías del volcán, lo que a su vez señala la necesidad de preservar la zona boscosa en esa región. Los ríos, en la parte media y baja de la cuenca del río Virilla, son un componente significativo de la recarga. Este hecho tiene implicaciones importantes, sobre todo en el Valle Central, donde la población depende de las aguas del subsuelo y donde se hace necesario garantizar la sostenibilidad del uso del recurso. La puesta en práctica de medidas más adecuadas de manejo de desechos y de protección de aguas superficiales y subterráneas es urgente.

Para años más recientes, se llevó a cabo una tercera investigación en nuestro país, realizada por Sánchez, R., Birkel, C., Welsh, K., Esquivel G., Corrales, J., Boll, J., Brooks, E., Roupsard, O., Saenz, O., Katchan, I., Mesén, R., Soulsby, C., & Araguas, L. (2013): *Key drivers controlling daily stable isotope variations in precipitation of Costa Rica: Caribbean Sea versus Pacific Ocean moisture sources*. En este estudio se recolectaron muestras durante el año 2013, en tres lugares estratégicos del país: Heredia (Valle Central), Turrialba (vertiente Caribe) y Caño Seco (vertiente Pacífico), para identificar los factores clave que controlan las variaciones en las aguas meteóricas de Costa Rica, utilizando isótopos estables.

Como principal aporte se tiene, gracias a los datos obtenidos, que el nivel de condensación por ascenso y la humedad relativa de la superficie son los principales factores que controlan las variaciones isotópicas. Estos resultados difieren del reconocido ‘efecto volumétrico’ en muestras recolectadas mensualmente en otros sitios dentro de los trópicos. La comprensión de la dinámica de estos isótopos estables dentro de un ambiente tropical permite aplicarse en los esfuerzos de modelación de aguas subterráneas en las cuencas no aforadas, donde no hay datos a largo plazo, lo cual limita drásticamente la gestión actual y futura de los recursos hídricos. Los resultados de este estudio pueden ser utilizados para predecir la composición isotópica de la precipitación diaria en la región, con implicaciones para la gestión de los recursos hídricos en otros lugares. Esto último puede ayudar a establecer el origen probable de las precipitaciones, las zonas de recarga de las aguas subterráneas y la susceptibilidad de un acuífero inducida por una estación seca prolongada.

En el área de estudio propiamente, la primera y única investigación con criterios hidrológicos fue desarrollada por Arce, Moya y Castillo (1990): *Diagnóstico para el*

control de inundaciones y ordenamiento de la Cuenca del Río Corredores, Región Brunca, Costa Rica. Esta investigación se centró en el estudio causal de las inundaciones que afectan la cuenca inferior de los ríos Corredor y Caño Seco, en el Pacífico Sur del país. Para ello, se analizaron los componentes meteorológicos, fitogeográficos, geomorfológicos, geológicos, geométricos y sociales de ambas cuencas, lo cual convierte este estudio en un importante precursor de la investigación por desarrollar.

Si bien el trabajo cuenta con una descripción del contexto general de la zona de estudio, no lo hace a un nivel de detalle que pueda aplicarse de manera directa en el estudio actual, pero sienta un precedente importante que puede ser consultado como guía de comparación en ciertos parámetros, como el clima y la geomorfología de la zona.

En cuanto a la aplicación del modelo matemático por utilizar, la principal referencia disponible se presenta en la investigación de Birkel et al. (2011): *Using lumped conceptual rainfall–runoff models to simulate daily isotope variability with fractionation in a nested mesoscale catchment.* En este trabajo se presentan 19 meses de datos de isótopos estables ($\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$), los cuales se emplearon para mejorar la comprensión de la dinámica del agua y el transporte de solutos en dos escalas espaciales ($2,3 \text{ km}^2$ y 122 km^2) en la cuenca agrícola del río Lunan, Escocia. Los datos isotópicos diarios en la precipitación y flujos semanales en lagos, así como los datos de isótopos de primavera y mensuales de las aguas subterráneas, revelaron importantes conocimientos sobre las vías de flujo y mezclas de agua en ambas escalas. Particularmente se determina una trayectoria de flujo de agua subterránea más profunda y previamente desconocida, que contribuye significativamente a un caudal total (25%-50%).

La dinámica de isótopos en el lago aguas arriba (susceptible al fraccionamiento por evaporación) también parecía tener una influencia importante en la composición isotópica de aguas abajo. La incorporación de la hidrología, los procesos de mezcla y el fraccionamiento basado en estos datos mejoraron estadísticamente simulaciones del flujo de isótopos $\delta^2\text{H}$. Los datos de isótopos estables ayudaron con éxito al modelo de conceptualización y en la calibración de un modelo de transporte con una mejor representación de la dinámica del proceso.

Por otra parte, en cuanto a los resultados del modelo matemático, y con respecto al tiempo de tránsito del agua, se encuentra el estudio de McGuire y McDonnell (2006), *A review and evaluation of catchment transit time modeling*, donde presentan una evaluación y revisión de la literatura del tiempo de tránsito del agua, en el contexto de las cuencas de captación y la estimación del tiempo de tránsito del agua.

La publicación está motivada por el nuevo interés en hidrología, sobre la estimación del tiempo de tránsito de la cuenca y la necesidad de distinguir enfoques y suposiciones en aplicaciones hidrológicas. La revisión se centra en el modelado de parámetros temporales del tránsito del agua y proporciona un análisis crítico de los problemas no resueltos cuando se aplica en una cuenca. Estos problemas incluyen la caracterización de entrada, estimación de la recarga, problemas en el registro de datos de longitud, muestreo de corrientes, selección de las distribuciones del tiempo de tránsito y la evaluación del modelo.

Finalmente, dichos autores promueven nuevos avances en la hidrología que aclararán y la formalización de suposiciones, limitaciones y metodologías en la aplicación de modelos de tiempo de tránsito en las cuencas. La presente investigación se apoya en algunas de las conclusiones advocadas por McGuire y McDonnell (2006) en la búsqueda de afinar y mejorar dicho método para aplicaciones en el medio tropical.

Los cambios en la composición isotópica del agua en el ciclo del agua se producen principalmente durante el paso del agua hacia y a través de la atmósfera. Las firmas isotópicas específicas engendradas por estos procesos están impresas en los cuerpos de agua terrestres y, por ello, su importancia de las múltiples aplicaciones de los isótopos en estudios hidrológicos. Ante esto, Mook y Meijer (2001), en su artículo "*Environmental isotopes in the hydrological cycle: Principles and applications*", brindan una comprensión detallada de los procesos complejos y cambiantes que participan en la dinámica del ciclo hidrológico y su efecto en la distribución isotópica. Como principal aporte se pueden destacar tanto los aspectos teóricos como empíricos de la parte atmosférica del ciclo del agua, así como la relación de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ en cuerpos de agua, que sirven en buena medida en la comprensión de las técnicas e investigaciones isotópicas.

Analizando los antecedentes hallados, tanto para el tema de estudio y el área en particular que se desea analizar, es posible vislumbrar la poca información existente hasta ahora. Solamente un estudio se ha realizado en la cuenca escogida y la información brindada no es lo suficientemente detallada para utilizarse de forma directa en esta investigación.

Si bien existe abundante literatura sobre el tema de técnicas isotópicas en estudios hidrológicos, esta solo cubre la parte teórica de la investigación, ya que muy pocas publicaciones antes realizadas, tanto en el país como en el extranjero, tiene el grado de detalle en cuanto a recolección y procesamiento de datos, como lo supone el presente estudio.

El modelo matemático propuesto se ampliará en el sentido de que se usa particularmente para investigar la variabilidad temporal del tiempo de tránsito, un aspecto que se asumió previamente como despreciable. Además, los contextos geográficos son completamente distintos. Originalmente se utilizó solo en medios templados y ahora se pretende utilizar en un medio tropical, donde las condiciones climáticas son diferentes. Por otra parte, el análisis de la línea meteórica y el tiempo de tránsito del agua en la cuenca no se analizaron con la precisión que se pretende formalizar en esta pesquisa, dando así un carácter pionero a la investigación en nuestro país y en la temática por desarrollar.

1.4. Objetivos

1.4.1. General:

1. Determinar el tiempo de tránsito del agua en la cuenca del río Caño Seco, mediante el uso de los isótopos $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$ y modelos de simulación

1.4.2. Específicos:

1. Realizar un análisis general de las características hidrológicas de la cuenca del río Caño Seco
2. Identificar las características isotópicas de la cuenca del río Caño Seco

3. Ajustar y aplicar un modelo isotópico para analizar el tiempo de tránsito del agua en la cuenca bajo condiciones hidroclimáticas variables
4. Establecer recomendaciones para un mejor manejo del recurso hídrico de la cuenca del río Caño Seco

1.5. Marco teórico: introducción a la temática de la investigación

La comprensión de la variabilidad en la composición de isótopos estables, tales como $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ en la precipitación (agua meteórica), en las aguas subterráneas y en las cuencas hidrográficas, ha sido ampliamente estudiada por investigadores que describen los procesos hidrológicos e hidrogeológicos. Algunos de esos investigadores han sido Maloszewski y Zuber (1982), McDonnell y Kendall (1992), Buttle (1994), Kendall y Caldwell (1998), McGuire y McDonnell (2006), Sánchez et al. (2013), Reynolds y Fraile (2009), y Birkel et al. (2011).

De todos los métodos utilizados para comprender los procesos hidrológicos en cuencas pequeñas, las aplicaciones con trazadores (en particular los trazadores isotópicos) han sido muy útiles en términos de proporcionar nuevos conocimientos sobre los procesos hidrológicos. Esto se debe, en parte, a la variabilidad que hay en pequeña escala para dar una indicación eficaz de los procesos de captación a escala detallada (McDonnell y Kendall, 1992; Buttle, 1994).

En contraste, las mediciones puntuales de cuencas internas, como las de nivel de agua o la composición de las aguas subterráneas, no se pueden utilizar sin extrapolación o supuestos adicionales sobre el comportamiento de captación (McDonnell and Kendall, 1992). Los isótopos $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ son parte integral de las moléculas de agua que cae en forma de lluvia. Esto los convierte en trazadores ideales de agua. A su vez, pueden ser aplicados a la escala de las cuencas, pues están implícitos en todos los componentes o procesos del ciclo hidrológico (Sklash, 1990).

Kendall et al. (1998) explican que los isótopos ambientales son de dos tipos: naturales y antropogénicos. Su amplia distribución en la hidrósfera puede ayudar en la solución de problemas hidrogeoquímicos. Los usos típicos de isótopos ambientales en hidrología incluyen:

- a) Identificación de mecanismos responsables en la generación de caudales

- b) Caracterización de la trayectoria del flujo de agua, desde que entra como precipitación hasta que sale de la cuenca
- c) Identificación de las fuentes de contaminantes
- d) Estimación del tiempo de tránsito del agua en la cuenca
- e) Evaluación del ciclo biológico de nutrientes en un ecosistema

Kendall et al. (1998) enumeran cuatro razones para considerar los isótopos naturales como trazadores de agua en cuencas:

- a) Las aguas que recargadas en diferentes momentos y lugares o que siguieron trayectorias de flujos distintas son, a menudo, isotópicamente distintas.
- b) A diferencia de la mayoría de los trazadores químicos, los isótopos ambientales son relativamente más estables en las reacciones con materiales de la cuenca, es decir, los isótopos de oxígeno e hidrógeno en agua conservan sus “huellas dactilares” distintivas, hasta que se mezclan con otras aguas de diferentes concentraciones u otros fluidos.
- c) Los solutos en las aguas de captación que se derivan de fuentes atmosféricas son, por lo general, isotópicamente distintos de solutos derivados de fuentes geológicas y biológicas dentro de la cuenca.
- d) Tanto el ciclo biológico de solutos como las reacciones de agua/roca, a menudo cambian las relaciones isotópicas de los solutos en direcciones predecibles y reconocibles. Estas interacciones a menudo pueden ser reconstruidas a partir de las composiciones isotópicas.

Para comprender de mejor manera los estudios isotópicos, primero es preciso estar al tanto sobre algunos términos y definiciones básicas de este tipo de estudios. A continuación, se exponen algunos lineamientos básicos para profundizar en el tema y que ayudarán a advertir en qué consisten, cuáles son las características y qué ventajas acarrea emplear isótopos en investigaciones hidrológicas.

1.5.1. Fundamentos isotópicos para estudios hidrogeoquímicos

La geoquímica isotópica es una disciplina central para los estudios del medio ambiente. Provee métodos de datación, trazadores, evaluación de información y las huellas digitales de los procesos químicos en casi todos los entornos. Hay 75 elementos que tienen isótopos útiles en este sentido, por lo que hay una gran variedad de métodos

isotópicos potencialmente disponibles. El campo de estudio ha crecido de forma espectacular, así como los medios tecnológicos que han sido desarrollados para medir pequeñas variaciones en la abundancia de los isótopos específicos y la proporción de isótopos con mayor precisión (Baskaran M., Porcelli D., 2011).

Dentro de la temática de esta investigación, es oportuno mencionar la teoría atómica molecular propuesta por Dalton, Avogadro y Proust, en el siglo XIX. Esta teoría explica que la materia es discontinua, de tal modo que la menor parcela que se puede obtener de un cuerpo es una molécula. Las moléculas, a su vez, pueden dividirse en unas entidades menores denominadas átomos; las moléculas de los cuerpos simples están formadas por átomos iguales entre sí, mientras que las moléculas de los cuerpos compuestos están formadas por átomos de dos o más clases. También, esta teoría afirmaba que los átomos eran indivisibles, a lo que alude su nombre (“átomos” que significa “no divisible” en griego) y que todos los átomos de un mismo elemento eran iguales. Por lo tanto, se define un átomo como la parte más pequeña y eléctricamente neutra de la que está compuesto un elemento químico y que puede intervenir en las reacciones químicas sin perder su integridad. Hoy se conocen más de 109 elementos químicos distintos, algunos de los cuales no existen en la naturaleza y se han obtenido artificialmente (Redondo, 2006).

En el átomo se pueden considerar dos partes: una central o núcleo atómico formado por protones (con carga eléctrica positiva) y neutrones, y una parte externa o corteza formada por electrones, con carga eléctrica negativa, los cuales giran alrededor del núcleo a semejanza de los planetas que giran alrededor del Sol.

1.5.1.1. Elementos, nucleidos e isótopos

Tal como lo indica la OIEA, los elementos están constituidos por átomos de diferente masa, llamados isótopos. Durante la evaporación y la condensación de agua, la concentración de oxígeno y el hidrógeno (isótopos que componen la molécula de agua) se somete a cambios pequeños. Los instrumentos modernos pueden medir estos cambios con gran precisión, lo cual determina los isótopos de cada elemento.

Para Fernández y Palacios, (2007), una especie atómica viene definida por dos números enteros: el número de protones que hay en el núcleo y el número total de protones más neutrones.

- a) El primero, llamado número atómico: Z , define el elemento químico al que pertenece el átomo.
- b) El segundo número, denominado número másico: A , es el número entero más próximo a la masa (expresada en unidades de masa atómica) del átomo en cuestión.

Tal como sugieren los autores, existen varias especies atómicas (o clases de átomos) que tienen el mismo número atómico, pero poseen números másicos distintos. Esto significa que dentro de cada elemento químico existen varias especies atómicas, que difieren en su masa atómica. Estas especies de un mismo elemento se llaman isótopos (isos: igual, topos: lugar), nombre que alude a que estos átomos ocupan el mismo lugar en la tabla periódica de los elementos. Por ejemplo, el hidrógeno tiene tres isótopos: el isótopo con $A=1$, denominado protio (que carece de neutrones); el isótopo con $A=2$, llamado deuterio (que posee 1 neutrón), y el isótopo con $A=3$, denominado tritio (que posee 2 neutrones).

Por otra parte, nucleido es el nombre genérico que se aplica a todos los átomos que poseen el mismo número atómico y el mismo número másico. Simbólicamente, cada nucleido se representa por $Z AM$, donde M es el símbolo del elemento químico al que pertenece, mientras que A y Z son sus números másico y atómico, respectivamente.

Dos nucleidos que difieren en el número másico, pero tienen un mismo número atómico, son “especies” de un mismo elemento químico. Se dice que estos dos nucleidos son isótopos de dicho elemento. De acuerdo con estas definiciones, nucleido se refiere a considerar cada especie por sí misma, mientras que el concepto isótopo implica una relación de comparación. Ahora bien, en la práctica se suele olvidar esta distinción semántica tan sutil entre ambos vocablos y, aunque no sea riguroso, es corriente el empleo de isótopo como sinónimo de nucleido, aunque no al contrario.

Cada elemento tiene isótopos que contienen neutrones en una cantidad inestable. Mientras que la mayoría también tiene vidas medias extremadamente cortas y se ven en condiciones artificiales (> 80% de los nucleidos 2500), hay muchos que son producidos por procesos de origen natural y tienen una larga vida media, para estar presentes en el medio ambiente en cantidades medibles (Baskaran et al., 2011).

Los isótopos radiactivos (inestables) son nucleidos (átomos con isótopos específicos) que se desintegran espontáneamente con el tiempo, para formar otros isótopos. Durante la desintegración, los isótopos radiactivos emiten partículas alfa o beta y a veces rayos gamma. Los isótopos estables son nucleidos que parecen decaer en relación con otros isótopos, en escalas de tiempo geológico, pero pueden ser producidos por la desintegración de isótopos radiactivos (Kendal et al., 1998).

1.5.1.2. Isótopos naturales

Los isótopos naturales son los que se encuentran en el medio de una forma natural. Redondo (2006) explica que, según estudios científicos realizados en el pasado, se ha demostrado que casi todos los elementos se componen de una mezcla de varios isótopos, y mientras que en ciertos casos (por ejemplo, el oro y el yodo) un isótopo supone el 100% de la sustancia, en muchos otros (como el cloro y el zinc) los diferentes isótopos se encuentran en proporciones comparables. En definitiva, se ha observado que en los materiales no solamente se encuentran distribuidos los 90 elementos naturales, sino también sus correspondientes 1300 nucleidos naturales conocidos. En el caso del hidrógeno, se conocen dos isótopos estables del mismo, tal como se refiere en la siguiente figura.



Figura 1. Isótopos de hidrógeno. Fuente: Glosarios servidor Alicante, 2013.

El mundo no sólo está ordenado en su faceta química, sino también en su dimensión isotópica. Este hecho da lugar a que muchas sustancias presenten de modo natural una firma o huella dactilar isotópica característica. Puede comprenderse, de esta manera, el gran interés que representa en muchos casos el conocimiento de la composición isotópica de las sustancias, ya sean estas de origen natural o artificial. Compuestos que químicamente son indistinguibles, pueden diferenciarse isotópicamente y obtener información acerca de su génesis y procesos evolutivos, entre otros (Redondo, 2006).

En la **figura 1**, se presentan los isótopos del hidrógeno, deuterio y tritio. Las diferencias entre ellos se encuentran únicamente en la masa atómica, como consecuencia de poseer diferente número de neutrones en su núcleo atómico. El tritio es un isótopo radiactivo.

Los isótopos de origen natural definen una trayectoria en la tabla de nucleidos, que corresponde a la mayor estabilidad de la relación neutrón/protón (N/Z). Para nucleidos de masa atómica baja, se logra la mayor estabilidad cuando el número de neutrones y protones son aproximadamente iguales (N=Z). Estos son los llamados isótopos estables (Kendall et al. 1998).

1.5.1.3. Unidades de medición

Composiciones de isótopos estables de elementos con baja masa, tales como oxígeno, hidrógeno, carbono, nitrógeno y azufre, normalmente se presentan como valores de δ . Dicho término se conoce como delta. Los valores de δ se indican en unidades de partes por mil (denotados ‰, permil o por mil) en relación de una composición conocida. Los valores delta se calculan a través de:

$$\delta \text{ (in ‰)} = (R_x / R_s - 1) \cdot 1000 \quad \text{Ec 1.}$$

En la **ec 1**: R_x es la relación molar entre el isótopo pesado y el ligero en la muestra y R_s en la referencia o patrón. La referencia R_s es, o son, derivados del VSMOW (Vienna Standard Mean Ocean Water de la OIEA) con valor 0.

El uso directo de R no es muy adecuado, porque sus valores son bajos (D/H promedio $\sim 0,00015$) y sus variaciones naturales son muy pequeñas (D/H en rango natural $0,00004 - 0,00018$). Sin embargo, en la práctica, las medidas isotópicas en los espectrómetros se hacen por contaje electrónico y comparando intensidades entre los picos de la muestra y una referencia de composición conocida, de forma que el *software* de los equipos usa R en sus cálculos. Por ello se encuentran algunos trabajos donde se emplea directamente la relación R, expresada en partes por millón.

Muy usualmente, se puede encontrar que las unidades de medida utilizadas en las concentraciones isotópicas están expresadas con valores positivos o negativos en permiles, o sea tantos por mil. Dichos valores negativos o positivos se toman a partir de un valor cero, asignado a los niveles encontrados a nivel del agua del mar. Es así como valores de $\delta^{18}\text{O}$ negativos indican que las concentraciones encontradas son menores a las que se pueden encontrar en aguas oceánicas, por ejemplo.

1.5.1.4. Fraccionamiento isotópico

El fraccionamiento isotópico es un fenómeno causado durante la evaporación y la formación de las nubes, donde el vapor de agua en las nubes tiene una composición isotópica más ligera que el océano que suministra el agua. Cuando se produce la condensación de las nubes y consiguiente formación de las gotas de lluvia, las moléculas isotópicas poseen concentraciones más pesadas. Una vez precipita la nube, el vapor de agua residual posee concentraciones de $\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$, mucho menores o ligeras, de ahí el llamado fraccionamiento isotópico.

Para Mook (2001), el fraccionamiento isotópico se puede definir como el fenómeno en el que la composición isotópica del elemento presenta ciertos cambios, por la transición de un estado físico o la composición química a otro, y donde se distinguen tres procesos del fraccionamiento isotópico, a saber: termodinámicos (en los sistemas de equilibrio físico o químico), cinética (en reacciones químicas unidireccionales) y el transporte o fraccionamiento durante procesos difusivos.

1.5.1.5. Línea meteórica

La línea meteórica consiste en una función lineal ($a=mx+b$), la cual explica cómo es la relación espacio temporal que existe entre las concentraciones de un isótopo y otro (*ec. 2*). Dicha línea meteórica es calculada mediante mediciones en las concentraciones isotópicas de muestras de agua meteórica, en escorrentía superficial o escorrentía subterránea, de un área de interés particular o incluso a nivel mundial. Para este caso, por citar un ejemplo, estudios realizados por la OIEA han establecido que en el planeta, la ecuación $\delta^2\text{H} - \delta^{18}\text{O}$ tiene una línea o ecuación tal que:

$$\delta\text{D} = 8\delta^{18}\text{O}+10 \quad \text{Ec. 2}$$

1.5.1.6. Factores que afectan a la composición o distribución isotópica

En su contexto general, el ciclo hidrológico consiste en que el agua se evapora, forma nubes donde se condensan gradualmente y cae en forma de lluvia. Al precipitar, parte de la lluvia se escurre, o fluye hacia el océano, otra es devuelta a la atmósfera por evapotranspiración y el resto se infiltra y se une a reservorios de agua subterránea. Estudios hidroquímicos revelan una creciente cantidad de información que está codificada en el agua durante este ciclo; depende de la hidroquímica para descifrar esta información y traducirla en términos utilizables para la gestión del recurso hídrico.

Las masas de aire se forman sobre diferentes regiones de los océanos, donde prevalecen temperaturas variables, lo que resulta en distintos grados de fraccionamiento isotópico, durante la formación de nubes y evaporación. Esto explica las variaciones observadas en la composición isotópica de las lluvias, que llegan a una región desde varias direcciones o en diferentes épocas del año. El agua está codificada con información isotópica incluso en las primeras etapas del ciclo del agua (formación de la nube). El viento transporta las gotas de agua de mar, hasta que se secan y forman granos de sal. Estas partículas de sales y rocío de mar llegan a las nubes y se llevan con ellos las trazas de isótopos. Cuando las nubes se desplazan hacia el interior de los continentes y se elevan por el efecto orográfico, el agua se condensa y precipita. El fraccionamiento isotópico aumenta las concentraciones del $\delta^2\text{H}$ y el contenido de $\delta^{18}\text{O}$ en el vapor de agua. Mientras la nube se mueve hacia el continente o las montañas, la lluvia producida se convierte progresivamente en los isótopos pesados Mazor (2005).

Es posible, entonces, establecer que las concentraciones isotópicas son determinadas por las siguientes cinco variables:

- a) Altitud
- b) Latitud
- c) Evaporación o temperatura
- d) Efecto continentalidad
- e) Efecto volumétrico

1.5.2. Trazadores isotópicos en cuencas hidrográficas

Además de proporcionar una comprensión de los procesos dentro de una cuenca, las técnicas isotópicas han sido fundamentales en la prestación de las reconstrucciones del clima en la cuenca y otros indicadores ambientales en diferentes escalas de tiempo. Las reconstrucciones temporales de tiempos largos (10^2 - 10^7 años) nos dan una perspectiva sobre los cambios actuales del entorno y cambios similares en el pasado (como periodos de CO_2 atmosférico elevado), que dan una idea de cómo nuestro entorno puede responder a los cambios antropogénicos. Reconstrucciones en el tiempo más cortas (10^0 a 10^3 años) nos proporcionan un registro de cómo nuestro entorno ha cambiado en los tiempos históricos y permite el análisis del papel de la actividad antropogénica en ese cambio (Shanley et al., 1998).

Los estudios anteriores demuestran el tipo de variabilidad isotópica que se espera en las aguas que contribuyen al caudal del río en las cuencas. Los isótopos del agua tienen el potencial de ser tan variables como las nuevas aguas que ingresan a la cuenca durante los eventos. Además, el enriquecimiento por evaporación de los isótopos del agua contribuirá a la diversidad isotópica de las aguas subterráneas en las cuencas donde los lagos son un componente importante. Los controles en la composición de isótopos parecen ser el tiempo de residencia del agua en las formaciones superficiales, y la distancia y dirección al flujo más cercano (Shanley et al., 1998).

Los isótopos ambientales $\delta^3\text{H}$ (tritio), $\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$ son componentes de la molécula de agua y, por tanto, trazadores ideales (conservadores) en el ciclo del agua. En este contexto, las diferencias básicas entre el $\delta^3\text{H}$ radionúclidos y los isótopos estables se refieren a su origen y los cambios en la concentración de las aguas naturales. Estos cambios se producen en el caso de $\delta^3\text{H}$, por la desintegración radiactiva y una

vida media de 12,43 años, mientras $\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$ están sujetos a fraccionamiento físico dependiente de la temperatura, durante el cambio de fase del agua (*tabla 1*) (Maloszweski P., Herrmann, Finke B, Schöniger M., Stichler W., 1990).

Isótopo	Tiempo de vida	En agua como	Proporción de isótopos en aguas naturales	Estándar internacional	Unidad	Exactitud de medición
$\delta^3\text{H}$	12,43 años	$^1\text{H}^3\text{HO}$	$^3\text{H}/^1\text{H}$ 0-10 ⁻¹¹	NBS-3H*	TU	1-10% del valor medido
$\delta^2\text{H}$	Estable	^2HHO	$^2\text{H}/^1\text{H}$ 90-170*10 ⁻⁶	V-SMOW*	δ	+/- 1‰
$\delta^{18}\text{O}$	Estable	$^2\text{H}^{18}\text{O}$	$^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 1880-2010-10 ⁻⁶	V-SMOW*	δ	+/- 0,15‰

Tabla 1. Principales características de isótopos naturales para el uso como trazador. Fuente: Moser y Rauert, 1980.

*V-SMOW y NBS-³H son normas que dan a entender que mediciones fueron calibradas con las directrices de la Agencia Internacional de Energía Atómica.

1.5.2.1. Usos de los trazadores isotópicos en cuencas hidrográficas

La historia o la vida del agua en diferentes partes del ciclo hidrológico se puede seguir por la abundancia de los isótopos pesados estables de hidrógeno $\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$. De esta manera, el agua desarrolla en diferentes entornos “huellas dactilares” isotópicas con lo que se puede identificar y rastrear sus orígenes. Este método permite una medición de la velocidad de movimiento de las aguas subterráneas. Sin embargo, Birkel et al., (2011) establecen que la distribución de estos tiempos de viaje se supone que reflejan todo el espectro de edades del agua y las posibles rutas del flujo, lo cual se ha demostrado que varía significativamente entre diferentes cuencas.

Es posible establecer entonces que, entre otras cosas, las técnicas de isótopos pueden:

- Determinar los orígenes y edades de los diferentes cuerpos de agua;
- Proporcionar una estimación del grado de mezcla;
- Determinar la ubicación y la proporción de la recarga de agua, y
- Indicar la velocidad del flujo de agua subterránea.

Los isótopos pueden proporcionar indicaciones preliminares de las trayectorias de flujo y los orígenes del agua.

Según estudios realizados por la OIEA, la recarga de las aguas subterráneas es un aspecto fundamental en la gestión de recursos y los isótopos pueden ayudar a determinar el área y la tasa de recarga. El área puede ser identificada mediante la medición de $\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$ y la correlación de las concentraciones de ellos a la altitud a la cual la precipitación podría haber filtrado en el suelo. La contaminación del agua de la superficie puede ser remediada mediante la prevención y controles deliberados, pero es más grave cuando la contaminación entra en el agua subterránea. El agua subterránea contaminada puede permanecer en los acuíferos durante siglos, incluso milenios, y es muy difícil si no imposible de limpiar.

Dicha organización asegura que las técnicas isotópicas pueden evaluar la vulnerabilidad de las aguas subterráneas a la contaminación de la superficie, mediante la determinación de la rapidez con que se mueve y en el lugar en que se está recargando mediante el uso de trazadores isotópicos, como los ya mencionados. Fuentes de contaminación a nivel de superficie pueden ser identificadas con bastante precisión, ya sean estas de tipo natural, industrial, agrícola o doméstica. Igualmente, las técnicas isotópicas también pueden identificar la contaminación incipiente, proporcionando una alerta temprana cuando los indicadores químicos o biológicos no son motivo de preocupación.

En este contexto, Birkel et al., (2011) exponen que los datos de isótopos ya han demostrado ser útiles para ayudar al desarrollo y evaluación de modelos orientados a los procesos en los que se utilizan trazadores de flujos. Los trazadores de isótopos estables del agua, por lo tanto, pueden mejorar la comprensión de cómo el agua se mueve a través de sistemas de captación. Su caracterización resulta adecuada para predecir cómo los sistemas pueden responder a futuros cambios ambientales.

Es oportuno recalcar que, tal como lo establece la OIEA, la interpretación de la composición isotópica en el agua terrestre requiere conocimiento sobre el agua meteórica que los alimenta. La composición isotópica del agua es muy variable en el tiempo y el espacio, y depende del clima, la geografía y otros factores.

Además, el efecto altitudinal sobre la composición isotópica de la precipitación ha sido observado en varios lugares del mundo. Conforme una masa de aire se desplaza desde la costa y asciende hacia las montañas, va enfriándose y perdiendo el agua isotópicamente más pesada. Esto hace que, a mayores elevaciones, donde las temperaturas son menores, la precipitación sea isotópicamente más negativa. Se ha observado una correlación entre la composición isotópica y la cantidad de lluvia denominada efecto de cantidad, atribuida al enriquecimiento evaporativo de las gotas de agua durante el verano, en zonas templadas. En áreas más tropicales, donde no hay variaciones marcadas de temperatura durante el año, la relación entre la composición isotópica y la cantidad parece ser controlada por la variación isotópica del vapor de agua en la misma región donde se origina. (Reynolds et al., 2009).

1.5.3. Modelos para la estimación del tiempo del tránsito del agua

El estudio de los tiempos de tránsito del agua subterránea es muy útil para la gestión del recurso hídrico frente a la contaminación por focos no puntuales y la datación de aguas mediante isótopos ambientales. La edad del agua subterránea es el tiempo que esta ha permanecido en el acuífero, contada desde el momento de su entrada, mientras que el tiempo de tránsito corresponde a la edad del agua en el momento en que abandona el sistema. En el punto de descarga, en realidad se encuentra una mezcla de aguas con distintos tiempos de tránsito, debido a la yuxtaposición de líneas de flujo con diferentes recorridos (Etcheverry et al., 2007). A continuación, se presenta una explicación del modelo de tiempo de tránsito que se empleará en la investigación.

El modelo estima el tiempo de tránsito del agua en la cuenca, donde la corriente de agua es una mezcla de todas las fuentes de agua con una edad (o tiempo de residencia), la cual es el reflejo de todas las edades de las precipitaciones que contribuyen al caudal del río y que ha caído en la cuenca en el pasado (Maloszewski y Zuber, 1982). Para ser más específicos, el tiempo de residencia es el tiempo (desde la entrada) que las moléculas han pasado dentro del sistema de flujo, mientras que el tiempo de tránsito se define como el momento transcurrido donde las moléculas salen del sistema de flujo. (Bolin y Rodhe, 1973; Etcheverry y Perrochet, 2000; Rueda et al., 2006).

La *figura 2* ilustra el modelo para la estimación del tiempo de tránsito del agua que drena en una cuenca, donde la cuenca recibe entradas (agua que contiene trazadores naturales) y que drenan a lo largo de la misma, por zonas saturadas y no saturadas, migra a través del suelo al subsuelo y a la red de corriente. El resultado del valor diferencial dentro de la cuenca es una señal de la salida del trazador (flujo base), que es amortiguada y es más baja, en relación con la precipitación que entra a la cuenca, es decir, en ella se maneja una distribución compleja de la trayectoria de flujo (Dincer, T., Payne, B.R., Florkowski, T., Martinec, J., Ton Giorgi, E.G.E.I., 1970; Maloszewski y Zuber, 1982; Pearce, A.; Stewart, M., y Sklash, M., 1986; Kirchner, J.W.; Feng, X., y Neal, C., 2000; Kirchner, J.W.; Feng, X., y Neal, C., 2001; Lindgren, G.; Destouni, G., y Miller, A., 2004).

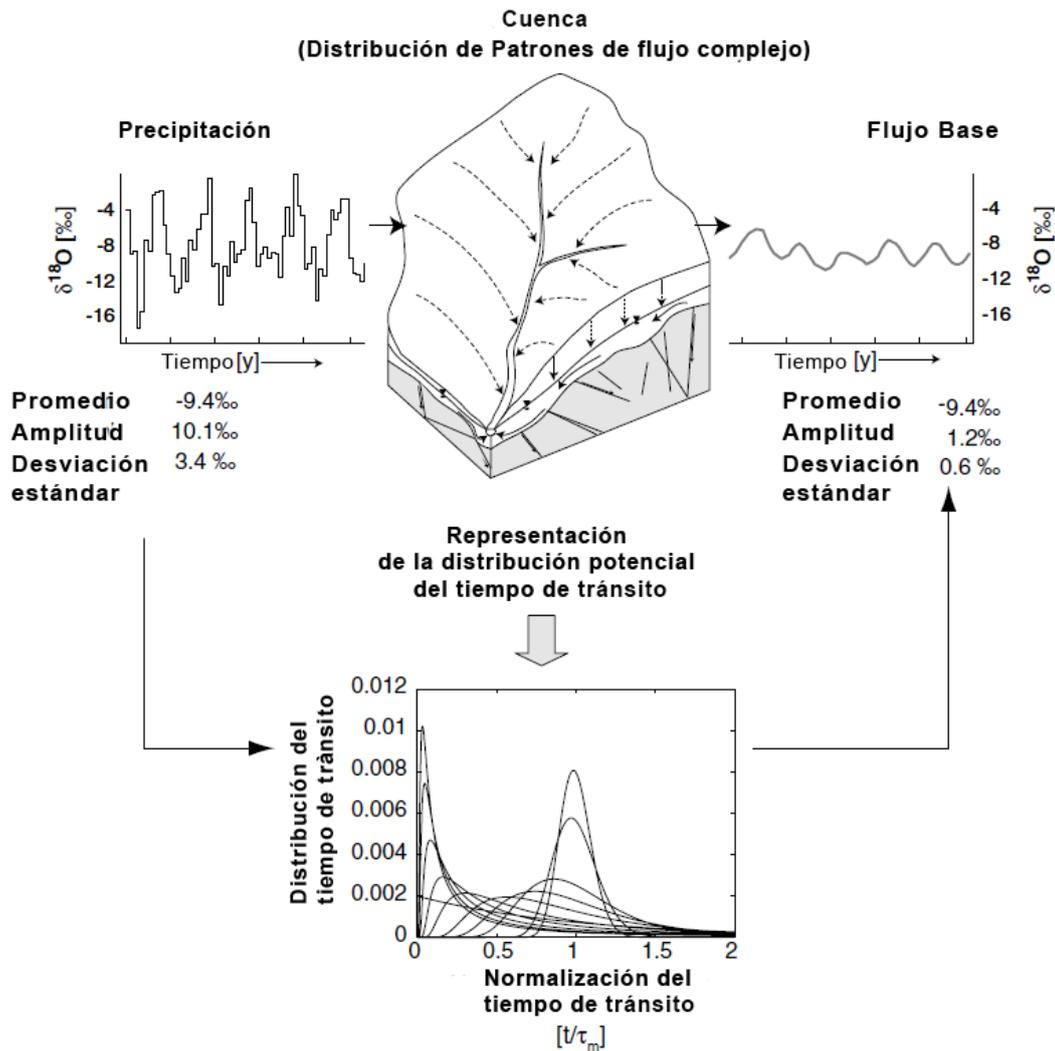


Figura 2. Transformación de una entrada variable en una salida más constante, por procesos hidrológicos complejos en una cuenca la cual va a condicionar la distribución y normalización del tiempo de tránsito, como concepto básico del modelo matemático por aplicar. Modificado según McGuire y McDonnell, (2006).

Una de las dificultades para la ejecución de este modelo es la cantidad de registros de datos. Si el registro de datos es muy corto, el cálculo de la distribución del tiempo de tránsito (DTT) va a tener mucha incertidumbre. El procesamiento de los datos para obtener el valor de los isótopos implica un costo económico alto, por lo tanto, la mayoría de los registros son semanales o mensuales, y muchas veces se puede omitir en ese registro algún evento extremo por motivos del día y la hora de la toma de datos.

Otra de las dificultades es la selección del tiempo de tránsito adecuado en las condiciones de la línea de la cuenca, donde muchas de las estimaciones de las condiciones del flujo se basan en aguas subterráneas, por lo tanto, la selección del modelo se realiza haciendo supuestos simplificados respecto a la geometría de los acuíferos. Finalmente, al ser un modelo de tipo caja negra, solo podemos controlar las entradas y salidas del mismo, pero no se puede conocer lo que pasa al interior del modelo.

El resultado obtenido con esta simulación, la DTT, tiene la particularidad de que no es constante temporalmente, es decir, el tiempo de tránsito no es el mismo todo el tiempo; sin embargo, los diferentes estudios que se han realizado en esta temática toman la edad media obtenida en las simulaciones, como una variable estándar para toda la serie de tiempo y la zona de estudio.

En la presente investigación se desea identificar los cambios en diferentes momentos, específicamente en época lluviosa y época seca, por lo que la secuencia temporal de datos de dos años continuos se analizará por periodos de seis meses cada uno, desplazándose paulatinamente un mes desde el inicio de la línea de tiempo hasta el final de la misma. Con esto, se pretende obtener la distribución del tiempo de tránsito en la cuenca de forma más detallada, y así analizar los cambios que se dan en la misma, según los contextos climáticos cambiantes en la zona.

Para comprender los procesos hidrológicos en cuencas, las aplicaciones con trazadores isotópicos han sido muy útiles, en términos de proporcionar nuevos conocimientos. El tiempo de tránsito (TT) del agua permite comprender la capacidad de almacenamiento de un acuífero, estimar tasas y velocidades de escorrentía superficial y subterránea, lo cual tiene distintas aplicaciones. Una de ellas es la determinación del tiempo de estadía de contaminantes dentro de la cuenca; además, puede determinar la cantidad máxima de agua que puede ser aprovechada para el consumo humano, riego o actividades industriales, sin afectar la dinámica hídrica de la cuenca.

Las variaciones espaciales y temporales en la respuesta hidrológica de las cuencas se determinan por variables cuasiestacionarias (casi no varía en el tiempo) como características del paisaje (la topografía y la naturaleza del subsuelo, geomorfología), así como las variables no estacionarias (características meteorológicas).

Los términos de distribución del tiempo de tránsito (DTT) y tiempos de tránsito alrededor de la media (MTT) se utilizan comúnmente para conceptualizar diferencias en la respuesta hidrológica, a través de intercomparaciones de cuencas (Hrachowitz, M.; Soulsby, C.; Tetzlaff, D.; Malcolm, I., y Schoups, G., 2010).

A partir de estudios desarrollados por varios investigadores (**tabla 2**) se ha profundizado en el desarrollo teórico de la distribución del tiempo de tránsito en las cuencas. Las cuencas bajo condiciones naturales se encuentran lejos de un estado estable del flujo, debido a que las condiciones climáticas tienen una gran variabilidad en las precipitaciones y la evapotranspiración.

Nombre	Referencia
Exponential	Eriksson, (1958); Haitjema, (1995)
Advection-dispersion (ADE)	Kreft y Zuber, (1978); Maloszewski y Zuber, (1982)
Gamma (2 parameters)	Kirchner et al. (2000); Scher et al. (2002)
Gamma (3 parameters)	Amin y Campana, (1996)
Catchment-scale ADE	Kirchner et al., (2001)
Stochastic–mechanistic	Destouni y Graham, (1995); Simic y Destouni, (1999); Foussereau et al., (2001); Lindgren et al., (2004); Rinaldo et al., (2005); Fiori et al., (2009)
Deterministic catchment-scale particle tracking	Darracq et al., (2009)

Tabla 2. Tiempo de tránsito de distribución del agua para cuencas hidrográficas.

Fuente: McDonnell, J. McGuire, K. Aggarwal, P. Beven, J., Biondi, D., Destouni, G., Dunn, S., James, A., Kirchner, J., Kraft, P. Lyon, S., Maloszewski, P., Newman, B., Pfister, L., Rinaldo, A., Rodhe, A., Sayama, T., Seiber, J., Solomon, K., Soulsby, C., Stewart, M., Tetzlaff, D., Tobin, C., Troch, P., Weiler, M., Western, Worman, A., Wrede, S., (2010).

Los modelos de parámetros concentrados (*lumped parameter model*) simplifican los procesos que ocurren dentro de una cuenca, al suponer la respuesta como lineal y promediando los parámetros más importantes. Por lo tanto, la distribución del tiempo de tránsito por lo general se infiere utilizando modelos de parámetros concentrados, que

describen el transporte integrado de trazador a través de una cuenca. Estos modelos no requieren detallada caracterización hidrológica del sistema físico y, en consecuencia, a menudo se utilizan para la caracterización de las cuencas, donde los datos son limitados (por ejemplo, los países menos desarrollados y cuencas no aforadas (McGuire et al., 2006).

La distribución del tiempo de tránsito puede ser determinada experimentalmente a partir de las variaciones temporales de los isótopos estables ($\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$), tritio (^3H) y otros trazadores, tales como el cloruro (Maloszewski y Zuber, 1982). Conceptualmente, el tiempo de tránsito puede ser representado como la respuesta o avance de un trazador sobre toda el área de la cuenca. Uno de los modelos que lo puede representar es el exponencial (*ec. 3*).

Ec. 3

$$g(t) = \frac{C(t)}{\int_0^{\infty} C(t) * D(t)}$$

$$g(t) = \frac{C(t) * Q}{M}$$

Donde, g (t)

C (t) = es un subconjunto de volumen de partículas de entrada inicial

Q = caudal

M = masa inyectada

Dt= derivada del tiempo

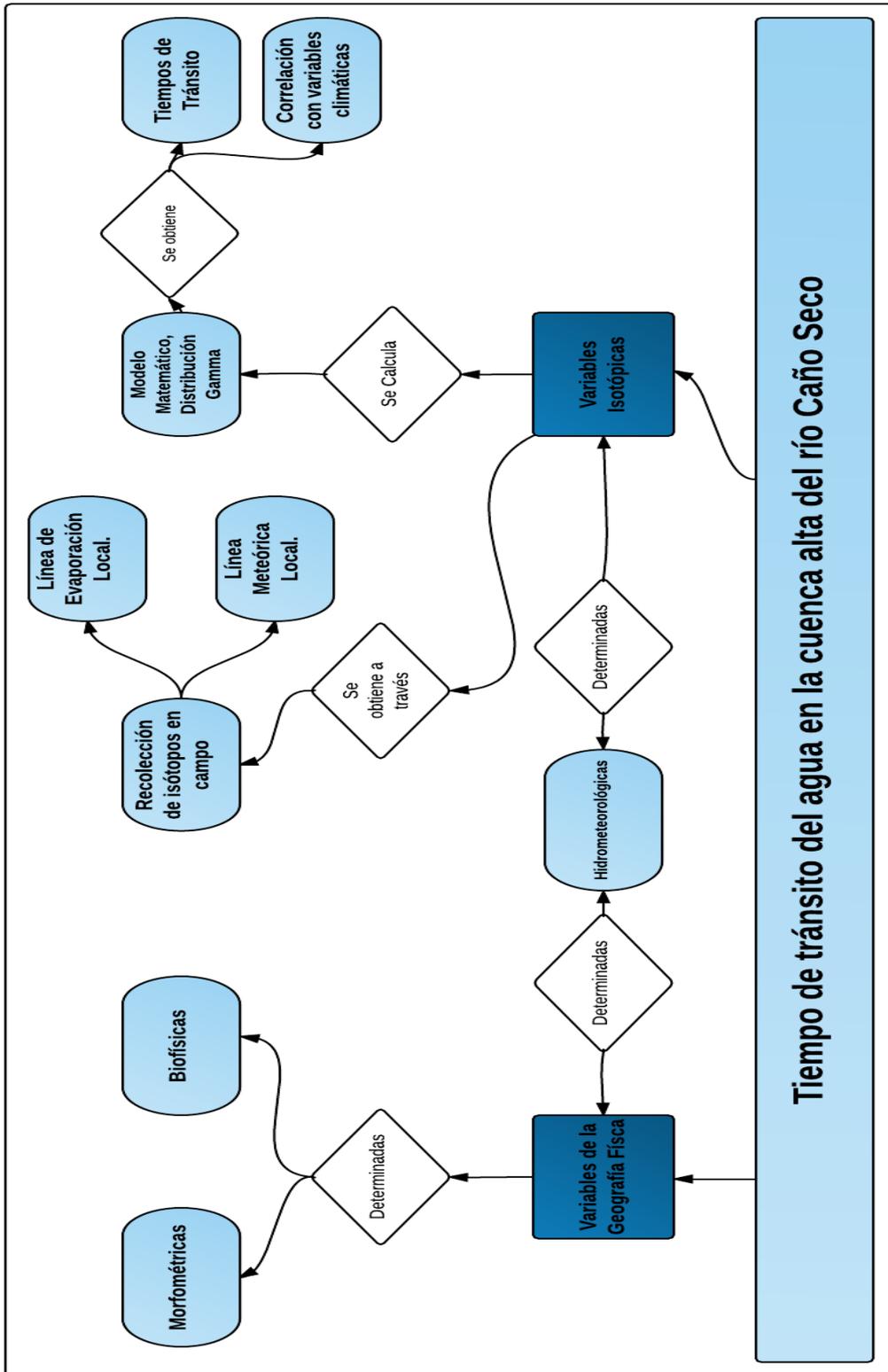
T= tiempo

Esto representa un único reservorio lineal, lo que implica que la muestra solo se toma en un punto de muestreo; por lo tanto, se asume *a priori* que no hay intercambio entre líneas de flujo. Sin embargo, se demostró que es matemáticamente equivalente a un reservorio *wellmixed* (bien mezclado) (Maloszewski y Zuber, 1982). La distribución exponencial es reconocida como una sobresimplificación de muchas cuencas, ya que estrictamente solo es aplicada a acuíferos granulares no confinados e isotrópicos. No obstante, la mayoría de las cuencas son altamente heterogéneas y presentan un comportamiento hidrológico no lineal (Hrachowitz et al. 2010).

El modelo por implementar consiste en un modelo matemático que se basa en la distribución gamma de dos parámetros, ya que posibilita mayor flexibilidad a la hora de tomar en cuenta las no linealidades en el comportamiento de una cuenca que tiene la misma distribución exponencial. Se detallarán las características de este modelo matemático en el apartado del marco metodológico.

1.6. Marco metodológico

Para estimar e interpretar el tiempo de tránsito en la cuenca del río Caño Seco se tomaron en cuenta variables, tanto de la geografía física de la cuenca como las características isotópicas, con la ayuda de los isótopos $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ (*modelo conceptual 1*).



Modelo conceptual 1. Para estimar e interpretar el tiempo de tránsito es requerido tomar en cuenta variables, tanto de la geografía física como isotópicas, específicamente las $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$. Elaborado por Méndez y Molina, (2016).

Con ambas variables (geografía física e isotópicas) y sus respectivos componentes, se entenderá de forma global las dinámicas de flujos internos y aspectos hidroclimáticos en la cuenca, que condicionan los tiempos de residencia del agua.

A continuación, se desarrolla en detalle el modelo conceptual previamente descrito, con las respectivas variables y componentes que se requiere para estimar el tiempo de tránsito del agua en la cuenca del Caño Seco.

1.6.1. Variables de la geografía física de la cuenca del río Caño Seco

La descripción de la geografía física de la cuenca integra los componentes morfométricos, los cuales permiten evaluar el comportamiento hidrológico de la cuenca, componentes biofísicos, compuestos por el uso de la tierra, geomorfología, geología, índice topográfico de humedad y cobertura de la tierra y finalmente componentes hidrometeorológicos que lo integran, como los aspectos climáticos e hídricos.

1.6.1.1. Componentes morfométricos de la cuenca

Uno de los factores más importantes en el análisis hídrico es la morfometría de cuencas, ya que nos permite establecer parámetros de evaluación del funcionamiento del sistema hidrológico de una región. Fuentes, (2004) explica cómo dicha herramienta es útil para el análisis espacial y ayuda en el manejo y planeación de los recursos naturales al permitir, en el marco de una unidad bien definida del paisaje, el conocimiento de diversos componentes como el tamaño de la cuenca, la red de drenaje, la pendiente media, el escurrimiento, etcétera. Estos componentes son obtenidos y modelados mediante el uso de sistemas de información geográfica. A su vez, al combinarlos con la geomorfología, se obtiene un diagnóstico hidrológico útil para la planeación ambiental. Para el cálculo y análisis de los parámetros morfométricos se utilizaron capas de información de la zona (que se detallarán más adelante) y *software* propios para este tipo de estudio, como lo son *Whitebox Gat* (Lindsay JB., 2009) y *ArcGis* (ESRI., 2015).

En la *tabla 3*, se realiza una descripción de los componentes de la cuenca con las respectivas ecuaciones que se utilizaron como método de cálculo para obtener la morfometría del área de estudio.

<i>Parámetros morfométricos</i>	<i>Método</i>	<i>Descripción</i>	<i>Fuente</i>
Aspectos de área			
Área en km ² (A)	Cálculo del área	Tamaño de la superficie de la cuenca en kilómetros cuadrados (km ²)	Schumm, (1956)
Perímetro en km (P)	Cálculo del perímetro	Longitud de la divisoria total de la cuenca	Schumm, (1956)
Longitud de la cuenca en km (Lb)	Cálculo de la longitud	Distancia horizontal del río principal entre un punto aguas abajo, y otro punto aguas arriba, donde la tendencia general del río principal corta la línea de contorno de la cuenca	Schumm, (1956)
Ancho de la cuenca (W)	$W=A/Lb$	Relación del área con la longitud de la cuenca	Villón, (2004)
Factor de forma F _f	$Ff = A/(Lb)^2$	Relación entre el área de la cuenca y su longitud máxima	Horton, (1932)
Coefficiente de compacidad (Kc)	$Kc=0,28\frac{P}{\sqrt{A}}$	Grado de circularidad. Valores cercanos a 1 indican tendencia a concentrar mayor volumen de escurrimiento	Gravelius, (1914)
Aspectos lineales			
Pendiente del cauce principal (SL)	$SL=\frac{\Delta h}{\Delta l}$	Pendiente de la cuenca es la relación del desnivel altitudinal que existe entre los extremos de la cuenca y la proyección horizontal de su longitud	Hack, (1973)
Longitud total de los cauces (Ls)	$\sum Ls$	Sumatoria de la longitud total de los cauces de la cuenca	Schumm, (1956)
Densidad de drenaje (Dd)	$Dd=Ls/A$	Longitud de los cauces por unidad de área	Faniran, (1968)
Orden de los ríos (U)	Orden jerárquico	Número de bifurcaciones que tienen sus tributarios	Strahler, (1964)

Tabla 3. Parámetros calculados para estimar las características morfométricas de la cuenca del río Caño Seco. Elaborado por Méndez y Molina, (2016).

Para los componentes expuestos en la **tabla 3**, se utilizaron criterios de clasificación para entender y vincular los procesos morfológicos con aspectos hidrometeorológicos y luego relacionarlos con los cálculos del tiempo de tránsito del agua en la cuenca. Seguidamente, se explican de forma detallada cada uno de esos componentes:

1.6.1.1.1 Área de la cuenca

Para Villón, (2004), una cuenca se puede clasificar atendiendo a su tamaño: cuenca grande y cuenca pequeña, donde una cuenca grande es aquella en la que predominan las características fisiográficas de la misma (pendiente, elevación, área, cauce). Una cuenca, para fines prácticos, se considera grande cuando el área es mayor de 250 km². Se considera pequeña aquella cuya área varía desde unas pocas hectáreas hasta un límite que, para propósitos prácticos, se considera de 250 km². De manera detallada, las cuencas pueden ser clasificadas, según su tamaño, de la siguiente manera:

Tamaño de la cuenca (km ²)	Descripción
Menor a 25	Muy pequeña
25 a 250	Pequeña
250 a 500	Intermedia-pequeña
500 a 2500	Intermedia-grande
2500 a 5000	Grande
Mayor a 5000	Muy grande

Tabla 4. Clasificación de una cuenca según su tamaño. Fuente: Villón, (2004).

1.6.1.1.2 Factor de forma (Ff)

Valores de Ff menores a 1 corresponden a cuencas redondeadas, mientras que valores de Ff mayores a 1 corresponden a cuencas alargadas. Del mismo modo, el resultado de la ecuación utilizada para estimar Ff (*tabla 3*) es comparable con la siguiente tabla, que brinda una clasificación a partir de los posibles valores por obtener, dada por Delgadillo y Moreno, (2009)

Valores aproximados	Forma de la cuenca
< 0,22	Muy alargada
0,22-0,30	Alargada
0,31-0,37	Ligeramente alargada
0,38-0,45	Ni alargada ni ensanchada
0,46-0,60	Ligeramente ensanchada
0,61-0,80	Ensanchada
0,81-1,20	Muy ensanchada
< 1,20	Redondeada

Tabla 5 Clasificación de la cuenca, según valores del factor de forma. Fuente: Delgadillo y Moreno, (2009).

1.6.1.1.3 Coeficiente de compacidad (Kc)

Este índice compara la forma de la cuenca con la de una circunferencia, cuyo círculo inscrito tiene la misma área de la cuenca en estudio. Este valor adimensional, independiente del área estudiada, tiene por definición un valor de 1 para cuencas imaginarias de forma exactamente circular. Los valores de Kc nunca serán inferiores a 1. Como expone Villón, (2004), existen tres categorías para la clasificación, según el valor de este parámetro:

Clase	Rango	Descripción
Kc1	1 a 1,25	Forma casi redonda a oval-redonda
Kc2	1,25 a 1,5	Forma oval-redonda a oval-alargada
Kc3	1,5 a 1,75	Forma oval– alargada a alargada

Tabla 6 Clasificación de la forma de una cuenca, según los valores del índice de compacidad de Gravelius. Fuente: Villón, (2004).

El grado de aproximación de este índice a la unidad indicará la tendencia por concentrar fuertes volúmenes de aguas de escurrimiento y es más acentuado cuanto más cercano sea a la unidad, lo cual significa que cuanto más bajo sea el Kc, mayor será la

concentración de agua. Cuencas con un K cercano a 1,0 tienen más problemas de crecientes (gastos muy grandes, inundaciones).

1.6.1.1.4 Pendiente de la cuenca hidrográfica

La pendiente de la cuenca es un parámetro importante en el estudio, ya que tiene una relación compleja con la infiltración del suelo y la contribución del agua subterránea a la escorrentía. Es uno de los factores que controla el tiempo de escurrimiento y concentración de la lluvia en los canales de drenaje, y tiene una correspondencia directa con las crecidas. Villón, (2004) menciona que la pendiente de la cuenca es la relación del desnivel altitudinal que existe entre los extremos de la cuenca y la proyección horizontal de su longitud.

Para la generación de las pendientes, se requieren las curvas de nivel del área de estudio y con la ayuda de un *software* (ArcGis, Whitebox, QGIS, entre otros.), se realizan los cálculos respectivos. Por su parte, el Ministerio de Agricultura y Ganadería de Costa Rica (MAG) presenta una clasificación porcentual de las pendientes que se muestra en la siguiente tabla, y con la cual se realizó la clasificación de las pendientes de la cuenca de estudio:

Rango	Categoría
0-2%	Plana
2,1-6%	Ligeramente ondulada
6,1-15%	Ondulada
15,1-30%	Fuertemente ondulada
30,1-50%	Escarpada
50,1-75%	Fuertemente escarpada
75,1 % y más	Montañosa

Tabla 7. Clasificación porcentual de las pendientes. Fuente: MAG.

1.6.1.1.5 Pendiente del cauce principal

El conocimiento de la pendiente del cauce principal (PCP) de una cuenca es un parámetro necesario en el estudio del comportamiento de recurso hídrico, por ejemplo, para la determinación de las características óptimas de su aprovechamiento

hidroeléctrico, o en la solución de problemas de inundaciones. Cuanto mayor sea la pendiente media de la cuenca, más facilidad de escurrimiento tendrá el cauce y, por tanto, mejor respuesta ante importantes eventos meteorológicos. Una clasificación que se les da a los cauces, según su grado de pendiente, es la siguiente:

Rango	Categoría
0-2%	Plano o casi a nivel
2-4%	Ligeramente inclinado
4-8%	Moderadamente inclinado
8-15%	Fuertemente inclinado
15-25%	Moderadamente empinado
25-50%	Empinado
50-75%	Muy empinado
<i>más de 75%</i>	<i>Extremadamente empinado</i>

Tabla 8. Clasificación de la pendiente del cauce principal de una cuenca. Fuente: Anaya, (2012).

1.6.1.1.6 Densidad de drenaje

Arce et al., (1990) mencionan que la densidad de drenaje es un factor primordial de análisis, pues es el reflejo directo de la influencia de la estructura (litología y tectónica), de la formación superficial (suelos), de la cobertura vegetal (tipo y densidad de la vegetación), del relieve (longitud e inclinación de las laderas) y del clima (principalmente precipitación y temperatura). Además, el drenaje es producto indirecto del tiempo, pues ninguno de los aspectos citados permanece invariable en el transcurso del mismo.

De igual forma, la densidad de drenaje condiciona el transporte de agua pluvial hasta la cuenca inferior del río, y esta será mayor en tanto la formación superficial sea más fina y coherente, la vegetación brinde poca cobertura al suelo y el valor del relieve relativo sea más alto. La clasificación para los valores de la densidad de drenaje son los siguientes:

Rango densidad de drenaje (km/km²)	Clasificación
Menor a 0,5	Pobre
De 0,5 a 2,5	Media
Mayor a 2,5	Buena

Tabla 9 *Clasificación de la densidad de drenaje de una cuenca. Fuente: Villón, (2004).*

Según Fuentes, (2004), este índice permite tener un mejor conocimiento de la complejidad y desarrollo del sistema de drenaje de la cuenca. En general, una mayor densidad de escurrimientos indica mayor estructuración de la red fluvial, o bien que existe mayor potencial de erosión. Pero, también, la densidad de drenaje provee una liga entre los atributos de forma de la cuenca y los procesos que operan a lo largo del curso de la corriente. Precisamente, la densidad de drenaje refleja controles topográficos, litológicos, pedológicos y de vegetación, además de incorporar la influencia del ser humano.

Para valores altos de drenaje, Villón, (2004) expone que los mismos representan zonas con poca cobertura vegetal, suelos fácilmente erosionables o impermeables. Por el contrario, valores bajos indican suelos duros, poco erosionables o muy permeables y coberturas vegetales densas.

1.6.1.1.7 Orden de las corrientes del río

Para obtener el orden de las corrientes del río, es preciso determinar el grado de ramificación de un curso de agua, para lo cual se considera el número de bifurcaciones que tienen sus tributarios, asignándole un orden a cada uno de ellos en forma creciente, desde el inicio de la divisoria hasta llegar al curso principal, de tal manera que el orden atribuido a ellos indique de forma directa el grado de ramificación de la red de drenaje. El orden de la cuenca está dado por el orden del cauce principal:

- Corrientes de primer orden: pequeños canales que no tienen tributario
- Corrientes de segundo orden: dos corrientes de primer orden se unen
- Corrientes de tercer orden: dos corrientes de segundo orden se unen
- Corrientes de orden n+1: dos corrientes de orden n se unen

1.6.1.1.8 Curva hipsométrica

La curva hipsométrica es la representación gráfica de la variación altitudinal de una cuenca y se obtiene a partir de un plano topográfico, tomando los valores en porcentajes del área que están por debajo de una determinada altura, que inicialmente serán la del punto más bajo de la cuenca e irá aumentando de acuerdo con los valores de las cotas de la curva de nivel que encierra las franjas de terreno por ellas definidas y el punto de salida que es generalmente el sitio más bajo de la cuenca.

En términos simples, la curva hipsométrica indica el porcentaje de área de la cuenca, o bien la superficie de la cuenca que existe por encima de cierta cota determinada. Llamas, (1993) plantea tres zonas o curvas hipsométricas (*figura 3*) y sus correspondientes implicaciones en la hidrología de la cuenca, que con las siguientes:

- Zona donde predomina la producción de sedimentos y aguas (ríos jóvenes)
- Zona donde predomina el transporte de ambos (ríos maduros)
- Zona caracterizada por la deposición de sedimentos (ríos en etapa de vejez)

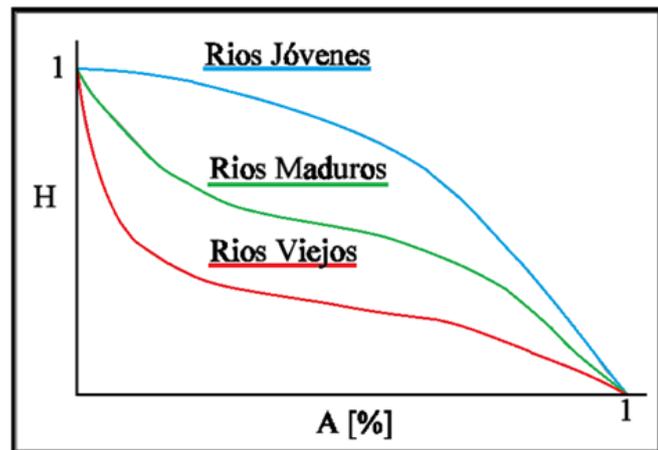


Figura 3. Clasificación de una cuenca según la curva hipsométrica. Fuente: Llamas, (1993).

1.6.2. Componente hidrometeorológicos de la cuenca del río Caño Seco

Para esta caracterización, se recolectaron datos hidrológicos y climáticos de la cuenca y se obtuvo información detallada de cuatro estaciones meteorológicas (tipo Davis, Vantage-Pro2), las cuales registran valores de temperatura, precipitación, humedad, velocidad y dirección de viento, entre otras variables. El registro se hizo cada 15 minutos, durante el periodo 2011 al 2014. Para el caso de los datos de la evapotranspiración se recurrió al método de Hargreaves, el cual será descrito posteriormente.

1.6.2.1. Evapotranspiración potencial por el método de Hargreaves

El método que se implementó para estimar la evapotranspiración es el modelo de Hargreaves y Samani, (1985). Se tomaron los datos de temperatura, precipitación y radiación solar de la estación meteorológica Las Cruces, localizada en el recinto de la Organización de Estudios Tropicales (OET), en San Vito de Coto Brus, a tan solo 1 km de la zona de estudio. Es importante señalar que los cálculos de la evapotranspiración en la cuenca de estudio son importantes para realizar los ajustes y cálculos correspondientes al tiempo de tránsito del agua.

El modelo HG se desarrolló combinando la ecuación original de Hargreaves para la estimación de la radiación solar, con la ecuación desarrollada por Hargreaves y Samani, (1985).

$$ET_{OHG} = k_g R_s \cdot (t_m + 17,8) \text{ Ec. 4}$$

$$R_s = k_{RS} \cdot R_a \cdot (T_{m\acute{a}x} - T_{m\acute{i}n})^{0,5} \text{ Ec. 5}$$

Donde:

ET_{OHG} = evapotranspiración de referencia estimada según el método HG

R_s = radiación solar (mm/día)

t_m = temperatura media diaria en grados Celsius °C

R_a = radiación solar extraterrestre (mm/día)

$T_{m\acute{a}x}$ = temperatura máxima diaria (°C)

$T_{m\acute{i}n}$ = temperatura mínima diaria (°C)

k_{RS} y k_g = constantes estimadas en el modelo

Para el valor de K_g , en la cuenca del Caño Seco se utilizó el valor establecido por Hargreaves y Samani, (1985), donde dicho valor corresponde a 0,0135. El método HG utiliza parámetros térmicos y radiación solar extraterrestre mensual, que se estima a partir de la latitud. En el caso de la zona de estudio, se tomó la latitud 9° 00". Del mismo modo, autores anteriores estimaron un coeficiente de radiación k_{RS} fijado en 0,17 para regiones semiáridas. Posteriormente, Hargreaves recomienda el uso de 0,16 para regiones interiores del continente y 0,17 para las zonas costeras, estableciendo así mejores criterios para calcular la evapotranspiración (Almorox et al., 2012). Por tanto, para la cuenca del Caño Seco se utilizó el coeficiente k_{RS} con un valor de 0,16.

En la **figura 4** se representa en un diagrama el modelo de Hargreaves, donde se debe calcular la radiación solar a través de K_g , radiación solar extraterrestre y las temperaturas máximas y mínimas, y luego se multiplica con la fórmula de $ET_{O_{hg}}$.

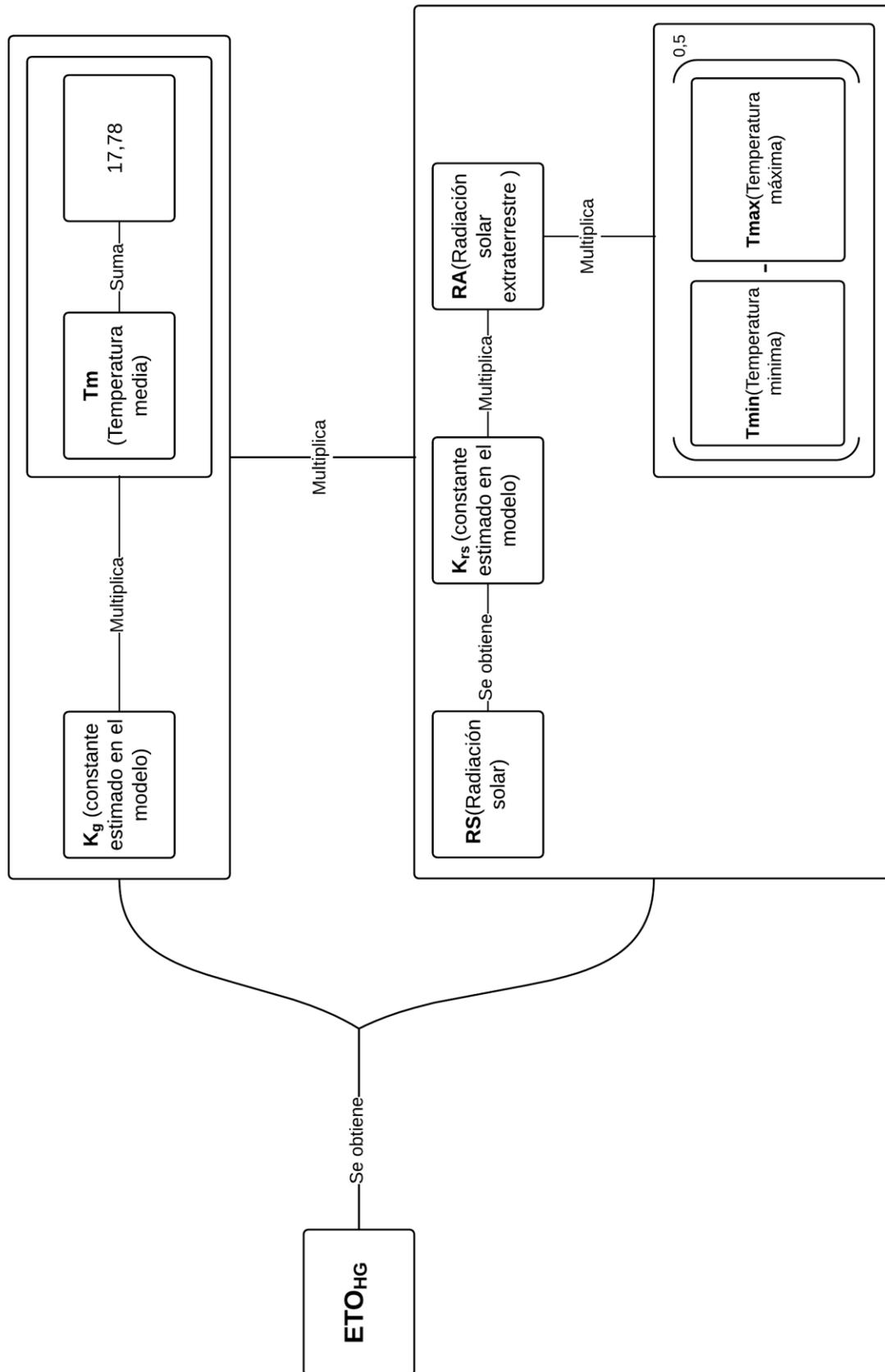


Figura 4. Diagrama que representa el proceso de estimación de la evapotranspiración potencial por el método de Hargreaves.

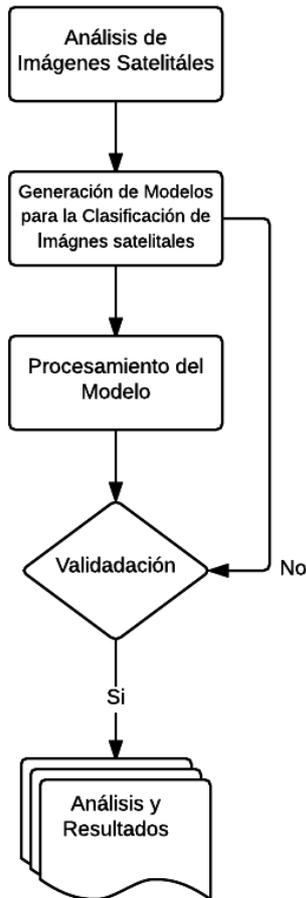
1.6.3. Componentes biofísicos de la cuenca del río Caño Seco

1.6.3.1. Tipos de suelo y cobertura de la tierra:

La definición de cobertura de la tierra es fundamental, pues en muchas clasificaciones y leyendas se le confunde con la definición de uso de la tierra. Para la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación (FAO, 2005), la cobertura de la tierra es la cobertura (bio)física que se observa sobre la superficie de la Tierra. Cuando se remite pura y estrictamente a la cobertura de la tierra, debería restringirse a la descripción de la vegetación y elementos antropogénicos. Por tanto, áreas donde la superficie terrestre consiste en afloramientos rocosos o suelo desnudo están describiendo la tierra propiamente y no la cobertura de la tierra. Así mismo, es discutible si se debiera considerar realmente a los cuerpos de agua como cobertura de la tierra.

Por su parte, dicha organización se refiere al uso de tierra como aquel que está caracterizado por los arreglos, actividades e insumos que el hombre emprende en un cierto tipo de cobertura de la tierra para producir, cambiarla o mantenerla. Esta definición establece un enlace directo entre la cobertura de la tierra y las acciones del hombre, en su medio ambiente. Así, la FAO, (2005), menciona por ejemplo que pastizal es un término de cobertura, mientras que área de pastoreo o cancha de tenis se refieren al uso que se da a esta cobertura.

A partir de esa diferenciación que establece la FAO, (2005), para esta investigación se decidió utilizar el término de cobertura de la tierra. Así mismo, para obtener este insumo se utilizó imágenes satelitales del sensor RapidEye de los años 2012 y 2014, donde se construyó un mapa de cobertura de la tierra actualizado. El alcance de esas imágenes permitió realizar una cartografía a escala 1:20000, debido a que el tamaño de píxel es de 5*5. Con la utilización de un sistema de información geográfica especializado para el manejo de imágenes satelitales (Erdas Imagine), se realizó la clasificación supervisada de las imágenes. En el *modelo conceptual 2* se observa el flujo de trabajo que conllevó el proceso de análisis de imágenes satelitales.



Modelo conceptual 2. Flujo de trabajo para el procesamiento de imágenes satelitales. Elaborado por Méndez y Molina, (2016).

Para la clasificación supervisada, se utilizó el módulo de *Supervised Classification* de *Erdas Imagine 2015*, donde se efectuó la clasificación no supervisada y luego se tomaron las firmas generadas, cuyos datos numéricos se archivaron en la computadora como regiones de interés, que constituyen los datos de entrenamiento y se realizó la clasificación supervisada. Las coberturas que se definieron fueron las siguientes:

1. **Bosque:** corresponde a los relictos boscosos y el bosque secundario
2. **Bosque en sucesión:** abarca las áreas con presencia de charral, tacotal y matorral arbóreo
3. **Pastos y cultivos:** se distinguen café, potreros, tomate, frijol y hortalizas
4. **Tierras yermas:** son aquellos terrenos desprovistos de vegetación o uso urbano
5. **Urbano:** áreas donde se aprecian casas, centros poblados y caminos

Para obtener los tipos de suelos, se utilizó la cartografía 1:200000 del Centro de Investigaciones Agronómicas (CIA) de la Universidad de Costa Rica, que está disponible para todo el país, información que fue contrastada con datos de campo, donde se distinguieron suelos andisoles y ultisoles, principalmente. Es importante señalar que la información de los suelos del CIA es una representación gruesa de las condiciones imperantes de los tipos de suelos en la cuenca, que permite, con la comparación de la información recolectada, generar un análisis del suelo y su efecto en los tiempos de tránsito *grosso modo* en la cuenca.

1.6.3.2. Geología y geomorfología

Etimológicamente, geomorfología deriva de las raíces griegas *geo* (tierra), *morphos* (forma) y *logos* (tratado). Por lo tanto, esta ciencia se preocupa de la forma de la Tierra. Schumm, (1991), citado por Gutiérrez, (2008), define la geomorfología como la ciencia que estudia los fenómenos sobre y cerca de la superficie terrestre, y se preocupa de las interacciones entre varios tipos de materiales y procesos, que implican los sólidos, líquidos y gaseosos, donde los efectos de la actividad antrópica son, con frecuencia, cruciales.

Por su parte, la geología proviene del griego *geo* (tierra) y *logos* (tratado), que es la ciencia que persigue la comprensión del planeta Tierra y es definida por Tarbuck y Lutgens (2014) como la ciencia que estudia los materiales que componen la Tierra y busca comprender los diferentes procesos que actúan debajo y encima de la superficie terrestre, además de comprender el origen y la evolución del planeta.

Para la elaboración de la geomorfología, se realizaron varias giras a la cuenca de estudio, para hacer un análisis de las formas, estructuras, composición y dinámicas de la cuenca y, con ello, identificar unidades geomorfológicas que permitan establecer, de forma clara, en el comportamiento hídrico y su efecto en el tiempo de tránsito del agua. Por otro lado, se generó un modelo de elevación digital con un tamaño de píxel de 5x5 metros, a partir de las curvas de nivel del proyecto fotogramétrico de regulación de catastro del año 2005, con el cual se facilita en gran medida la identificación de las distintas geoformas de la región.

Finalmente, en lo que respecta a la geología, fue generada con la ayuda de la base de datos para Costa Rica (Atlas 2014), realizada por el *U.S. Geological Survey* (USGS), la Dirección General de Geología y Minas e Hidrocarburos, y la Escuela Centroamérica de Geología de la Universidad de Costa Rica, información que fue contrastada con visitas a campo y trabajos de investigación previos.

En este apartado, es preciso mencionar que, si bien las escalas de elaboración, tanto de la fuente del Atlas 2014 (1:50000) como la de la USGS (1:200000), no presentan una cartografía en detalle del área de estudio, sí permiten un análisis general y que concuerda en buena medida con las observaciones realizadas en campo y, por ello, se dispuso utilizar dichas fuentes de información.

1.6.3.3. Índice de humedad topográfica (ITH)

Este índice está relacionado con la humedad edáfica y refleja la tendencia del suelo a la generación de escorrentías, debido a que los perfiles con mayor humedad son más propensos a saturarse, por lo que la precipitación caída sobre ellos puede convertirse mucho más fácilmente en escorrentía. Así, cuanto más elevado es el valor de este índice, mayor humedad debe presentar la celda en función de su configuración topográfica, la cual es extraída de un modelo de elevación digital.

Roa-Lobo y Kamp, (2012), mencionan que el ITH combina la contribución al escurrimiento de un área local drenada y su pendiente y es comúnmente usado para cuantificar el control topográfico sobre los procesos hidrológicos y está definido como:

$$\ln (af/\tan\beta) \text{ Ec. 6}$$

Donde:

af = área local drenada para un punto de cálculo

β = pendiente direccional de la celda de interés (y de las ocho vecinas en el caso de utilizar un algoritmo D [8])

Este modelo expresa parcialmente el volumen relativo y la cantidad de movimiento del flujo que pasará por cada punto del terreno. A mayor área drenada y menor pendiente, se incrementa la concentración y saturación hídrica en los suelos; áreas con valores altos de ITH son zonas de concentración del escurrimiento.

Roa-Lobo y Kamp, (2012), explican cómo esta variable es un atributo compuesto del terreno, ya que proviene de dos primarios. Cuando el área de captación se incrementa y el gradiente decrece, el índice de humedad y el contenido de humedad del suelo disminuyen. Al combinar datos sobre gradiente y área de captación, dicho índice toma en cuenta tanto la geometría de la pendiente local como la localización del sitio en el paisaje. Por lo tanto, correlaciona mejor con la humedad del suelo que con el área específica.

El índice de humedad controla las acumulaciones de flujo, la humedad del suelo, profundidad de la tabla de agua, evapotranspiración, profundidad del suelo, materia orgánica, contenido de limos y arenas, distribución de la cobertura vegetal; por lo tanto, es muy útil en estudios de vegetación, agricultura, hidrología y geomorfología. El ITH asume condiciones de estado estable y espacialmente condiciones invariables para la infiltración y la transmisividad.

En áreas completamente planas, el cálculo de este índice puede no ser útil, de tal modo que valores muy bajos de pendiente pueden arrojar resultados de una magnitud exagerada para estas expresiones, porque el modelo conceptual de distribución del agua no aplica en terrenos totalmente planos: en estas áreas, el movimiento del agua se debe a gradientes sub superficiales del agua y no al dominio de la gravedad.

1.6.4. Variables isotópicas

En este apartado, se explican los procesos que se llevan a cabo para la recolección de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ en la lluvia y caudal del río Caño Seco, como parte de los componentes necesarios para ejecutar el modelo.

De la misma manera, se explica el modelo matemático de distribución gamma que se implementó para estimar los tiempos de tránsito, la estandarización de los datos de entrada y la calibración del modelo para obtener resultados óptimos. Luego, se describe cómo se calculó la línea meteórica local, a partir de los datos de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ en la precipitación.

1.6.5. Recolección de muestras de agua para la obtención de información de concentraciones isotópicas

Durante los últimos años, se han implementado con mayor frecuencia y de manera más diversa y eficiente nuevas técnicas investigativas en Hidrología. Una de ellas es el uso de trazadores, los cuales permiten estudiar y comprender el comportamiento del recurso agua en una región y tiempo de interés. Esto da, como resultado, una mejor y mayor planificación hidrológica que permite la preservación y distribución del recurso de manera más eficaz.



Figura 5. Aforo y técnica de recolección del agua en el cauce del río Caño Seco.

Según Duarte y Sánchez, (2005), los trazadores son sustancias que pueden ser introducidas o ya están presentes en un sistema, y que permiten estudiar la evolución temporal y espacial de un determinado proceso químico, físico, biológico o industrial, a través de su detección o medición, ya sea de manera visual o analógica. De esta manera, estas sustancias se comportan como verdaderos espías, introduciéndose en un sistema en forma prácticamente desapercibida, para luego brindar información acerca del mismo, a un observador externo. Gran variedad de trazadores se utiliza en la Hidrología, para comprender diferentes procesos, como el movimiento del agua, el tiempo de residencia, así como cuantificar y modelar el transporte del agua y de sustancias contaminantes.

Se contó con muestras de aguas, tanto de escorrentía como de lluvias. Estos datos son del periodo entre agosto del 2012 y agosto del 2014. Dichas muestras fueron recolectadas en recipientes analíticos de 2 ml de agua, inmediatamente después de un evento de lluvia y en el río, para establecer una serie de tiempo diaria.

En el caso de las muestras de agua en escorrentía, la recolección fue llevada a cabo con la utilización de una polea y un recipiente, que se hacía descender hasta el nivel del flujo de agua y, con ello, obtener las muestras de agua, labor realizada por personal capacitado para el correcto muestreo de los datos. Para las muestras de agua de lluvia, se recolectó, mediante un recipiente, el agua llovida, para luego trasladarla a pequeños frascos de vidrio sellados. En total se recolectó un promedio de 15 pares de muestras por mes, hasta agosto del 2014. Los estudios de la concentración isotópica del agua fueron procesados en el laboratorio isotópico del *Northern Rivers Institute*, de la Universidad de Aberdeen, Reino Unido.

1.6.6. Modelo matemático para estimar el tiempo de tránsito del agua en la cuenca

El modelo de simulación (*ecuación 3*), para determinar tiempos de tránsito, ayuda a entender el tiempo del viaje que lleva el agua a través del subsuelo, desde la zona de captación hasta la red de drenaje y es un descriptor fundamental para una cuenca, que revela información sobre el almacenamiento, vías de flujo y la fuente de agua en una sola característica. La distribución de los tiempos de tránsito ayuda a entender cómo las cuencas pueden retener y liberar agua y solutos que, a su vez, controlan ciclos geoquímicos, biogeoquímicos y la persistencia de una contaminación (McGuire et al., 2006).

La aplicación de modelos matemáticos, para simular el tiempo de tránsito que lleva el agua desde su captación hasta la salida de la cuenca, así como la edad del agua, permite llegar a comprender mejor la dinámica hidrológica de una cuenca,

Para la cuantificación de la media del tiempo de tránsito y, más importante aún, la distribución del tiempo de tránsito, se proporciona una descripción principal de un sistema hidrobiogeoquímico y estudios de sensibilidad de la cuenca en relación con las

entradas antropogénicas y el cambio del uso de la tierra (McGuire et al., 2006). Por lo tanto, el TT y su distribución por lo general se infieren utilizando modelos y parámetros concentrados que describen el transporte integrado de un trazador, a través de una cuenca.

Estos modelos no requieren una detallada caracterización hidrológica del sistema físico de la cuenca y, a menudo, sus resultados se utilizan para caracterizar las cuencas, pero hay que tener en cuenta que los datos son limitados (en especial en países poco desarrollados y donde no hay registros en las cuencas), situación que revaloriza la importancia y novedad del presente estudio, ya que se cuenta con datos continuos y con un gran nivel de detalle (diario y semanal), que es único en el país y en la región.

Junto con las características hidrogeomorfológicas que presenta el área de estudio, la validación de este modelo permite, además, dar lineamientos para el manejo del recurso hídrico y patrones para un ordenamiento territorial en la cuenca.

El tiempo de tránsito del agua a través del sistema se puede explicar utilizando la siguiente ecuación (*ec. 7*)

$$T_t = t_{out} - t_{in} \text{ Ec. 7}$$

Donde τ_t es el tiempo transcurrido que tiene el agua desde la entrada hasta la salida, a través de un sistema, donde el momento se define como t_{in} y el de salida como t_{out} (McDonnell et al., 2010).

En los estudios de trazadores en Hidrología y en la presente investigación se utiliza con frecuencia el modelo que se basa en la distribución gamma de dos parámetros. Este tipo de modelo permite más flexibilidad a la hora de tomar en cuenta las no linealidades en el comportamiento de una cuenca que otro tipo de distribuciones utilizadas, tales como la exponencial. La distribución gamma de dos parámetros (**Ec. 8**), propuesta por Kirchner et al., (2000), es tanto conceptual y matemáticamente más adecuada para representación de los resultados de un proceso mixto con un alto grado

de libertad y ofrece una mayor flexibilidad para incorporar diferentes distribuciones de rutas de flujo (Hrachowitz et al., 2010).

$$g(\tau) = \frac{\tau^{\alpha-1}}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} e^{-\frac{\tau}{\beta}} \quad \text{Ec. 8}$$

Donde α es el parámetro de forma, β es el parámetro de escala y el tiempo de tránsito medio es el resultado de multiplicar esos dos parámetros $\tau = \alpha\beta$. Donde $\alpha = 1$, la distribución gamma es una aproximación estrecha de la distribución exponencial. Sin embargo, se ha demostrado para un amplio rango de cuencas que α está muy por debajo de 1, lo cual refleja un pronunciado pico inicial del trazador y largas colas en el punto de muestreo. En otras palabras, para la mayor parte de las cuencas más solutos son lavados en periodos cortos y permanecen por periodos mucho más pronunciados de lo que sugiere el modelo exponencial (Hrachowitz et al., 2010; Godsey, Sarah E.; Aas, Wenche; Clair, Thomas A.; de Wit, Heleen A.; Fernandez, Ivan J.; Kahl, J. Steve; Malcolm, Iain A.; Neal, Colin; Neal, Margaret; Nelson, Sarah J.; Norton, Stephen A.; Palucis, Marisa C.; Skjelkvale, Brit Lisa; Soulsby, Chris; Tetzlaff, Doerthe; Kirchner, James W., 2010).

El parámetro α tiende a presentar variabilidad espacial, que está relacionada con características topográficas, paisajísticas y geomorfológicas, entre otras, mientras el parámetro β , en el tiempo, tanto a lo largo del año como entre años, en respuesta a variables meteorológicas (Hrachowitz et al., 2010). El TT del agua y el MTT están condicionados por variables físicas, tales como la topografía, tipo de suelo, cobertura y clima. Todo esto puede afectar la ruta del flujo hidrológico, almacenamiento del agua y procesos de mezcla asociados.

1.6.7. Línea meteórica

La línea de regresión fue utilizada para construir la línea meteórica local (LML), a partir de datos diarios de las $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ en la precipitación. También se construyó la línea de evaporación local, a partir de datos diarios de las $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ en el caudal del río Caño Seco. Para Camacho y Guzmán, (2005), la variación en las desviaciones de $\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$ producidas por el fraccionamiento isotópico, da lugar a efectos observables en los componentes **a** y **b**, que caracterizan a la recta meteórica ($y=ax+b$).

Estas variaciones se presentan para el coeficiente **a** como un aumento o disminución en la pendiente, y para **b** en un distinto punto de corte con el eje y ($\delta^2\text{H}$). Estos cambios permiten caracterizar y comparar las aguas con respecto a su procedencia o verificar si una muestra se ha evaporado al construir la denominada línea de evaporación local (LEL), la cual se obtiene de los datos (concentraciones de $\delta^2\text{H}$, concentraciones de $\delta^{18}\text{O}$) de masas de agua como lagos, embalses u otras expuestas a constante evaporación. Esta se caracteriza por tener una pendiente entre 4 y 6, con un exceso de $\delta^2\text{H}$ negativo (*figura 10*).

1.6.8. Estandarización y tabulación de los datos de entrada

La información obtenida de las muestras de agua, tanto precipitada como en el cauce, fue tabulada mediante la ayuda de una hoja electrónica (Excel). Cada muestra recolectada tiene asociada una serie de parámetros: fecha de recolección, origen (lluvia o cauce), cantidad de lluvia reportada en las estaciones meteorológicas locales, así como las $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$. Es oportuno señalar que, en esta investigación, no todos los días del periodo analizado poseen datos asociados, debido a ausencia de lluvias o de personal capacitado para la recolección de muestras durante todos los días, además de errores en la recolección de esos datos.

Para contrarrestar los vacíos de información (que representan en el caso de los datos de las concentraciones en lluvia de los isótopos, un 38% de un total de 638 días analizados), se procedió a generar un promedio de las concentraciones de ambos isótopos y asignar estos valores a las casillas vacías, con la finalidad de tener una secuencia de datos continua y que el modelo matemático genere los mejores resultados posibles, además de que el modelo aplicado no permite vacíos de información dentro de la línea de tiempo de estudio.

1.6.9. Calibración del modelo

El TT del agua se calcula a través de un modelo global de distribución gamma de dos parámetros, donde los parámetros α y β se multiplicaron para obtener el TT. Para

construir el modelo y ejecutarlo en el *software* R, se utilizaron insumos como la precipitación, $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ presentes en la precipitación, y en el caudal, así como la evapotranspiración potencial, calculada con el modelo de Hargreaves.

Para estimar el TT, el modelo ejecutado fue optimizado, con el uso de un algoritmo genérico de evolución diferencial llamado DeOptim (DE). Dicho algoritmo está particularmente bien adaptado para encontrar el valor óptimo global de una función con valores reales de los parámetros y no requiere que la función sea continua o diferenciable (Mullen, K.; Ardia, D.; Gil, D.; Windover, D, y Cline, J., 2011).

La función DE busca los mínimos de la función objetivo entre los límites inferior y superior de cada parámetro, para ser optimizado. Estos límites se definen previamente, lo cual asegura que los datos no sobrepasen dichos límites y que los resultados sean satisfactorios, según los parámetros establecidos (Mullen et al., 2011).

La idea principal de los algoritmos evolutivos se basa en la selección natural, donde las poblaciones de los parámetros son modificadas a lo largo de las siguientes generaciones, usando operaciones aritméticas para minimizar una función objetivo (Price et al., 2006), citado por Birkel et al., (2011). Durante este proceso, se conservó el mejor parámetro de poblaciones, después de cada 100 evaluaciones, hasta la convergencia hacia un mínimo global.

Se definieron 10 000 iteraciones, donde el modelo se ejecutará las veces necesarias hasta que encuentre un resultado satisfactorio. Es decir, el algoritmo se detiene después de un determinado número de generaciones, o después de que el valor de la función asociada con el objetivo encuentre el mejor resultado por debajo del umbral preestablecido.

Este análisis se realizó en el *software* R, utilizando los paquetes DeOptim. Se ejecutó una serie de tiempo de dos años, a una resolución diaria que incluía los datos de concentración en precipitación y caudal de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$, además de los datos de precipitación y evapotranspiración. Dichos datos se utilizaron como archivo de entrada en formato csv, para ejecutarlo en el modelo, donde se sometieron a un proceso de

calibración y de iteración, para encontrar el resultado óptimo para el parámetro α y β , los cuales se utilizaron para la estimación del TT.

2. Capítulo segundo: Monitoreo hidrometeorológico e isotópico

2.1. Caracterización del área de estudio

El estudio de la morfometría de una cuenca es de tipo cuantitativo, utilizado para analizar la red de drenaje, pendientes, forma, elementos formadores, entre otros, y que moldean y caracterizan una cuenca. Este estudio resulta de gran utilidad, ya que permite analizar la semejanza entre cuencas de diferentes tamaños y las dinámicas que en ellas resultan. A partir de los datos generados, es posible desarrollar planes de manejo y prevención de riesgos, pues con ellos se puede identificar, entre otras cosas, zonas de potencial inundación, comportamiento de los cauces, capacidad de respuesta de una cuenca ante eventos naturales como fuertes precipitaciones, sequías u otros.

Las características físicas de una cuenca hidrográfica son importantes desde el punto de vista hidrológico y geomorfológico, ya que son estos los que se ven más inmersos en los procesos de escorrentía y la morfogenia de la cuenca. Estos factores pueden ser divididos en dos grupos, uno que depende especialmente de las condiciones climáticas imperantes y otro que se refiere a las características morfométricas de la cuenca.

En este capítulo, se presenta un análisis de las características fisiográficas, geológicas, hidrológicas y ambientales, de tal forma que permita tener un panorama más detallado de las condiciones de la cuenca y su influencia en el tiempo de tránsito del agua. Sin embargo, es pertinente mencionar que, al analizar el efecto de las distintas variables en el tiempo de permanencia del agua en la cuenca, se tomó en cuenta que los resultados obtenidos en el modelo matemático representan una integración de la totalidad de las características propias de la cuenca, aguas arriba del punto de control.

Por tanto, no es posible establecer un efecto directo o medible de cada variable respecto al tiempo de tránsito, en un momento o un espacio determinado, sino una relación integrada de todas estas variables, que determinan propiamente los tiempos de residencia del agua. A su vez, al no existir otra cuenca con estudios similares en Costa

Rica, no se posee un parámetro de control para cada una de las características y su efecto directo en los tiempos de permanencia del agua.

2.1.1. Características morfométricas de la cuenca

En esta sección, se presentan los resultados de los análisis de las características morfométricas de la cuenca, donde se incluyen datos referentes al área, perímetro, elevación, pendiente y datos concernientes a la red hídrica de la cuenca (densidad de drenaje, longitud y orden de los cauces, entre otros), y su influencia en los tiempos de estadía del agua en la cuenca.

La cuenca del río Caño Seco posee una extensión de 31,21 km², una longitud de 5,24 km, y un ancho de 5,96 km, así como un perímetro de 30,27 km. Estos parámetros, según Villón, (2004) (*tabla 3*), le otorgan la categoría de cuenca pequeña. Una característica de este tipo de cuencas es que tiene mayor influencia de las lluvias de fuerte intensidad y pequeña duración, y de las características físicas (tipo de suelo, vegetación), que a las variables morfométricas del cauce propiamente (largo, densidad de los cauces, entre otros).

Por otra parte, estudios realizados por McGuire et al., (2005) muestran que el tiempo total de permanencia del agua en una cuenca es una integración de los diferentes tiempos de residencia de las subcuencas. Dichos estudios han dado a entender que existe una correlación positiva entre el área y el tiempo de tránsito del agua. Sin embargo, la extensión de la cuenca no está relacionada con la cantidad de días u horas que permanece el agua allí, pues existe una mejor relación entre el tiempo medio de residencia y la topográfica interna de la cuenca, ya que esta tiene la capacidad de controlar la velocidad del transporte de los flujos.

La longitud y el ancho de la cuenca se relacionan con los tiempos de tránsito del agua, en cuanto que cuencas muy largas o anchas generan mayores tiempos (con pendientes similares), que cuencas más redondeadas. Estos datos son de gran importancia al calcular los índices de forma y compacidad de la cuenca, donde los cálculos realizados para la cuenca del río Caño Seco revelaron un valor de 1,14 para el

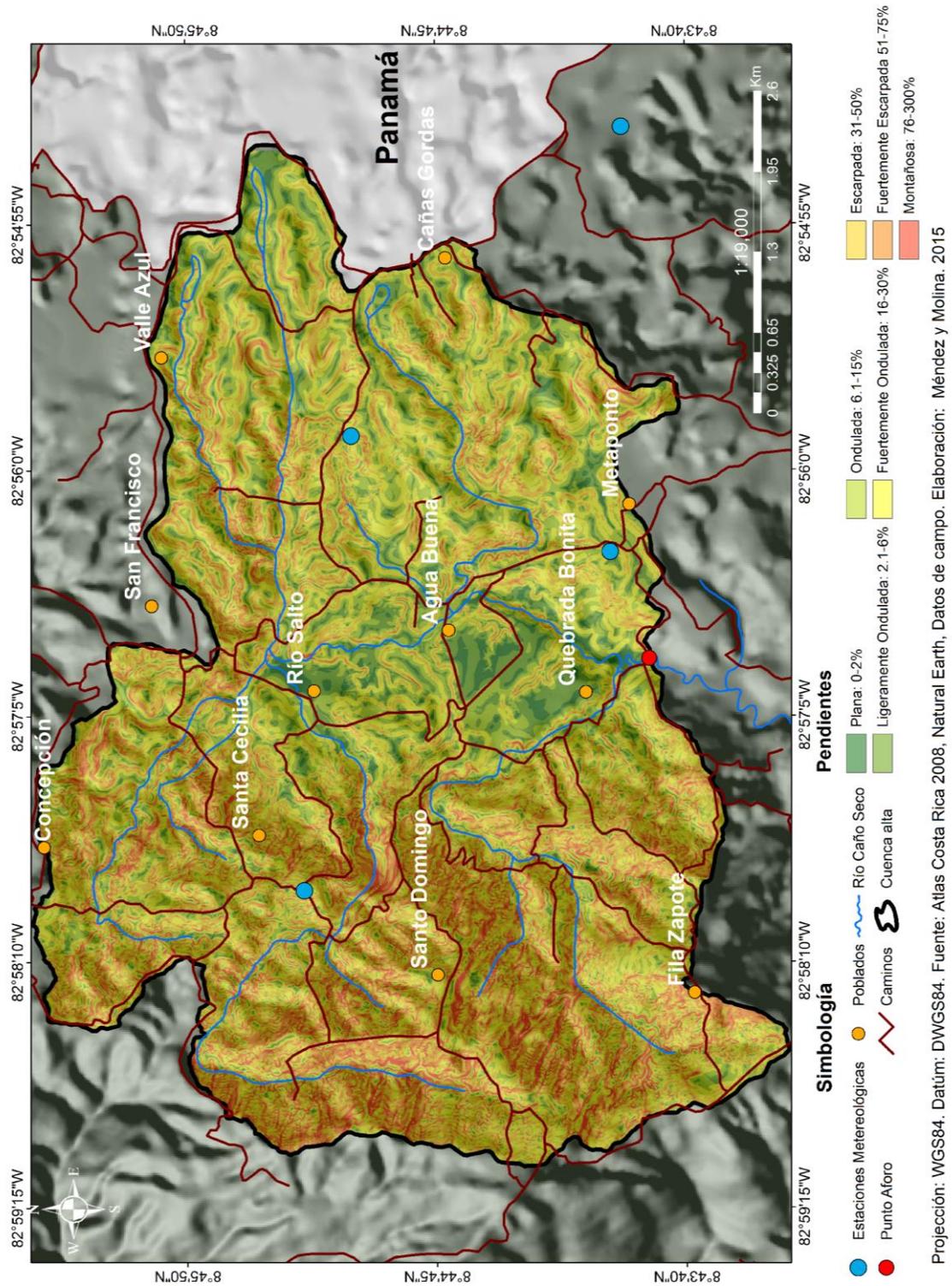
factor de forma. Esto indica que la cuenca tiene una forma muy ensanchada (*tabla 4*), tal como se aprecia en el mapa 1.

Ante ello, Delgadillo y Moreno, (2009) describen que una cuenca ensanchada posee mayor susceptibilidad a generar crecidas, ya que el tiempo de recorrido del agua a través de la cuenca es mucho más corto que en cuencas alargadas. En otras palabras, las cuencas ensanchadas tienen menor tiempo de concentración y, por ende, mayor rapidez para la concentración de los flujos de aguas superficiales y generan mayor violencia en sus crecidas. Caso contrario ocurre con las cuencas alargadas, donde el tiempo de viaje del agua es mucho más largo y eso contribuye a que los picos de crecidas sean menos repentinos, en caso de lluvias concentradas o tormentas.

Por su parte, los datos correspondientes al coeficiente de compacidad (K_c) de la cuenca de estudio revelan un valor de 1,52, lo cual corresponde a una forma oval alargada (*tabla 6*). Esta clasificación concuerda con la clasificación dada en el factor de forma, donde se clasifica a la cuenca como muy ensanchada y a la forma de la cuenca mostrada en el mapa de ubicación (mapa 1), dando así validez a los valores calculados. Por otro lado, tal como se mencionó anteriormente, cuencas con K_c cercanos o superiores a 1 tienden a tener más problemas de crecientes (gastos muy grandes, inundaciones), que aquellas con valores menores. Así mismo, al analizar este índice y el índice de forma, se establece que la forma general de la cuenca ayuda a reducir los tiempos de estadía del agua en la época lluviosa.

La zona de estudio presenta una altitud máxima de 1475 m y una mínima de 1036 m, mientras que la altitud media corresponde a 1163 m, parámetros que ayudan a visualizar de mejor manera el comportamiento altitudinal de la zona y que son importantes al establecer la pendiente media de la cuenca que, según los cálculos realizados, expresa un valor medio de 20,79%, clasificada según el MAG como fuertemente ondulada (*tabla 7*). La cuenca presenta dos áreas contrastantes en su distribución altitudinal y las pendientes que en ellas se encuentran. Es posible identificar, en el *mapa 2*, un sector caracterizado por forma en medias lunas y pendientes suaves que rondan valores de pendiente entre 8% y 10% (sector este), y otro sector con pendientes medias a fuertes (25%-30%) en la parte oeste de la cuenca. Todo

ello conlleva a una diferenciación en la capacidad de acumulación, infiltración y generación de escorrentía superficial en la cuenca.



Mapa 2. Clasificación de pendientes en porcentaje para la cuenca del río Caño Seco. Elaborado por Méndez y Molina, 2015.

Al analizar el **mapa 2** respecto a los dos sectores antes mencionados, podemos establecer que el sector este corresponde a una zona ondulada, mientras que el sector oeste entra en categoría fuertemente ondulada.

McGuire et al., (2005) explican que existe una relación directa entre la pendiente de la cuenca y el tiempo de tránsito del agua, donde cuanto mayor sea la pendiente media de la cuenca, menores serán los tiempos de residencia, mientras que cuencas con pendientes de suaves a planas tienden a acumular la humedad y, por tanto, aumenta sustancialmente el tiempo de tránsito del agua.

En el caso de la cuenca del estudio, al tener una pendiente media de 20,79%, se cataloga como una cuenca de pendiente media-alta. Esto conlleva a que la escorrentía superficial se genere rápidamente y, con esto, se limita la capacidad de infiltración y retención del agua en el suelo y el subsuelo. Lo anterior trae como consecuencia una aceleración en la velocidad de tránsito y, por tanto, una disminución en el tiempo de residencia del agua. Por todo esto, McGuire et al., (2005), mencionan que la relación pendiente-cuenca (más que la forma, el tamaño y la precipitación de la cuenca) se presenta como la de mayor importancia respecto al tiempo de tránsito.

Consecutivamente, los cálculos realizados para la pendiente del cauce principal dan como resultado un valor de 15,11%, valor que establece que el cauce del principal de la cuenca del río Caño Seco posee una categoría de moderadamente empinado, según la clasificación dada por Anaya, (2012) (*tabla 8*). Lo anterior se evidencia en el mapa de pendientes (*mapa 2*), donde se aprecia como el cauce principal atraviesa desde su nacimiento, hasta el sector de río Salto, zonas de fuertes pendientes que se reflejan en el valor obtenido para el cauce principal.

La cuenca presenta una densidad de drenaje catalogada como buena, ya que posee un valor de 2,72 km/km² (*tabla 9*). Ello tiene implicaciones en la respuesta del cauce ante eventos hidrológicos, como son las tormentas, ya que una cuenca con una buena densidad de drenaje implica una mejor y mayor captación, así como un traslado más efectivo de las aguas superficiales y, por ende, menores tiempos de estadía de dichas aguas. No obstante, se debe tomar en cuenta que las aguas subterráneas, como

uno de los factores biofísicos de la cuenca, poseen la capacidad de condicionar los tiempos de residencia del agua en la cuenca, pero al no contar con muestras y datos para comparar con otras cuencas similares, se dificulta la determinación del grado de impacto en el tiempo de tránsito del agua.

Para el caso del orden de las corrientes de agua, se obtuvo un orden de nivel 3, lo cual es un orden medio-alto; según Fuentes, (2004), cuanto más alto es el orden de la cuenca, ello indica un drenaje más eficiente, que desalojará rápidamente el agua. A su vez, si tomamos en cuenta los valores de la densidad del drenaje, es posible establecer que la capacidad de respuesta y transporte de la cuenca son altas, lo cual implica una reducción en los tiempos de tránsito y una aceleración de la velocidad de la escorrentía superficial.

2.1.1.1. Curva hipsométrica

En la gráfica generada para la curva hipsométrica de la cuenca (*figura 6*), es posible apreciar cómo gran parte de la cuenca (aproximadamente el 50%), se encuentra entre los 1030 m y los 1150 m de altitud, franja altitudinal que abarca los sectores planos y ondulados en la cuenca, por lo que un alto porcentaje corresponde a zonas semiplanas y que aumenta el tiempo de tránsito del agua, por la poca pendiente presente en dichas áreas. Además, en estas zonas se favorecen la retención y acumulación del agua, gracias a la baja pendiente.

Por otra parte, el otro 50% de la cuenca presenta zonas de fuerte pendiente (40% en promedio) y es por donde el cauce principal tiene mayor recorrido (65% del trayecto), lo que da como resultado una mejor capacidad de drenaje, a causa de drenar un mayor porcentaje del área de la cuenca y, por ende, compensa las áreas de retención de agua, lo que reduce el tiempo de estadía de la misma.

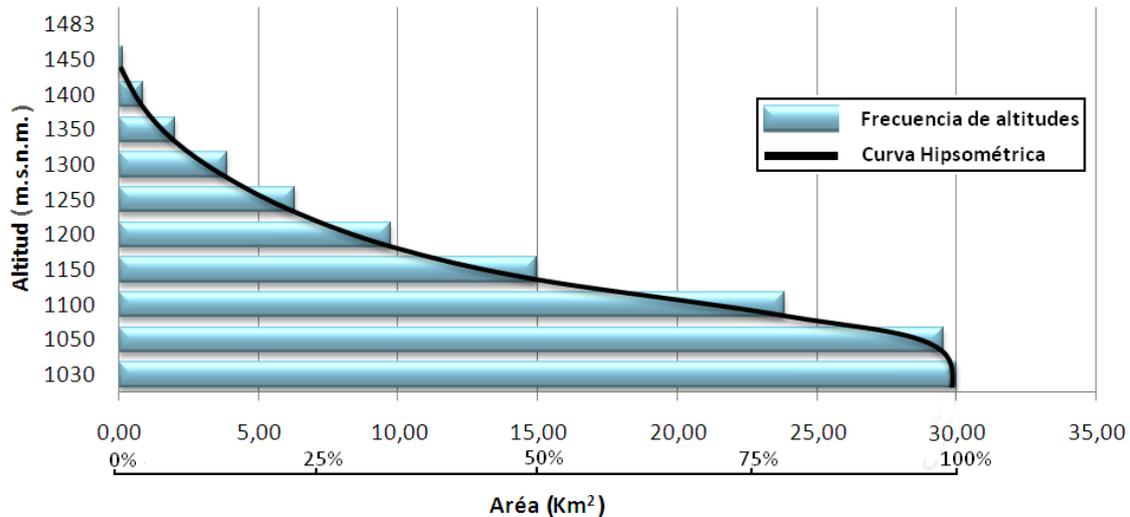


Figura 6. Gráfica de la curva hipsométrica y frecuencia de altitudes para la cuenca del río Caño Seco. Elaborado por Méndez y Molina, (2015).

Con respecto a la clasificación de la curva hipsométrica dada por Llamas (*figura 3*), se obtiene que, para la cuenca del Caño Seco, la curva hipsométrica arroja como resultado una zona donde predominan tanto el transporte de aguas como la erosión y, por ende, transporte de materiales; en consecuencia, el río Caño Seco se ubica dentro de la clasificación de un río maduro.

Si bien este resultado es un producto generalizado para toda la cuenca, Cortés (2016) menciona que, en este caso, se trata de una cuenca anómala, es decir, donde hay una constitución geomorfológica particular en forma de altiplano, con características de detalles de modelado particular (medias naranja, meandros, formaciones superficiales profundas de características particulares, pendientes en la zona de recarga pronunciadas hacia el oeste, dominio de pendientes suaves en la mayor parte de la superficie de la cuenca donde el flujo hídrico superficial suele estancarse en numerosos sitios, entre otros aspectos).

Además, se da un control estructural por una falla inversa (Fila de Cal), la descarga fluvial hacia el área de sedimentación a través de una garganta estrecha. Todo ello conlleva a que sólo el sector oeste de la cuenca realmente presente características de un río maduro, mientras el centro y este de la cuenca no pueden ser clasificados de la misma manera.

2.1.2 Características climáticas

La cuenca del río Caño Seco se encuentra bajo un régimen climático ecuatorial, tal como lo mencionan Arce et al., (1990), con temperaturas promedio de 19,5 °C y precipitaciones medias anuales que rondan los 3200 mm. El área de estudio presenta dos máximas y dos mínimas de precipitación; no obstante, dichos autores mencionan que este régimen es modificado para el área, tanto por la influencia de las brisas marinas como por los rasgos topográficos presentes en la zona, ya que el primer factor afecta la distribución anual de la precipitación, mientras que el segundo afecta la distribución espacial de la misma.

Así mismo, se distinguen dos estaciones bien definidas: una seca y otra lluviosa. La estación lluviosa se extiende desde mayo hasta noviembre, mientras que abril y diciembre son meses de transición. La estación seca se extiende, consiguientemente, desde enero hasta marzo. Una síntesis de las condiciones climáticas de la cuenca se presenta en la siguiente tabla:

Año	2012	2013	2014	Promedio
Temperatura (°C)	19,49	19,58	19,74	19,60
Humedad (%)	86,25	87,42	89,03	87,57
Velocidad del viento (m/s)	1,01	3,88	5,81	3,57
Dirección del viento (°)	235,32	208,69	231,09	225,03
Presión barométrica (hPa)	879,76	879,86	879,83	879,82
Radiación solar (w)	134,92	123,78	111,7	123,5
Lluvia (mm)	3083,30	3038,86	3370,63	3164,26
ET aproximada (mm)	860,77	994,34	1083,64	979,58

Tabla 10. Características climáticas de la cuenca del río Caño Seco. Elaborado por Méndez y Molina, (2015).

En la *tabla 10* se muestra cómo, para los años 2012 y 2013, se evidencian los efectos del fenómeno de El Niño en la cuenca, pues para estos años se presentaron niveles de precipitación muy inferiores al promedio anual (81 mm y 125 mm, respectivamente) y una humedad ligeramente menor (1,5% menos) que los valores promedios.

Lo contrario ocurrió con la radiación solar para el año 2012, la cual fue más elevada (11 w respecto al 2013 y 23 w por encima del 2014) que los otros dos años de estudio. La velocidad de viento y la evapotranspiración fueron, a su vez, variables que descendieron en el 2012 y el 2013, tanto respecto al 2014 como al promedio general. Por otra parte, la temperatura, la presión barométrica y la dirección de viento se mantuvieron similares en el periodo de estudio. Para el 2014, las condiciones climáticas fueron estables con valores de precipitación, temperatura y evapotranspiración más cercanos a la media anual.

Se observan dos periodos muy contrastados, un periodo seco que va desde el año 2012 hasta el 2013 y un segundo periodo mucho más lluvioso, para el año 2014. Estos dos periodos de discrepancia, principalmente en la precipitación, tienen un efecto en los tiempos de tránsito, ya que la cantidad de humedad en la cuenca es un factor que acelera o disminuye los tiempos de tránsito del agua, puesto que a mayor cantidad de agua, más rápidamente se satura el suelo y se favorece la escorrentía; sin embargo, no es la razón principal, como se menciona en la sección 2.1, donde se establece la pendiente como el factor de mayor influencia en los tiempos de tránsito del agua en una cuenca. Tener muestras de periodos secos y lluviosos en distintos años favoreció la investigación realizada, puesto que permitió ver el efecto en los cambios hidroclimáticos en la cuenca y en el tiempo que dura el agua en transitar por la misma.

A nivel intraanual se obtuvieron los siguientes datos:

Año	2012		2013		2014	
	Enero-junio	Julio-diciembre	Enero-junio	Julio-diciembre	Enero-junio	Julio-diciembre
Temperatura (°C)	19,72	19,26	20,03	19,14	20,06	19,41
Humedad (%)	83,09	89,4	84,17	90,67	85,44	92,61
Velocidad del viento (m/s)	1,11	0,91	1,52	6,23	6,58	5,03
Dirección del viento (°)	227,72	242,91	181,47	235,91	226,5	235,67
Presión barométrica (hPa)	879,66	879,86	879,84	879,88	879,66	879,99
Radiación solar (w)	130,39	113,86	115,85	153,99	91,69	131,71
Lluvia (mm)	991,61	2091,69	926,84	2112,02	1164,88	2205,75
ET aproximada (mm)	466,19	394,57	611,36	382,98	614,9	468,74

Tabla 10. Variables climáticas por periodos de tiempo de seis meses en la cuenca del río Caño Seco. Elaborado por Méndez y Molina, (2015).

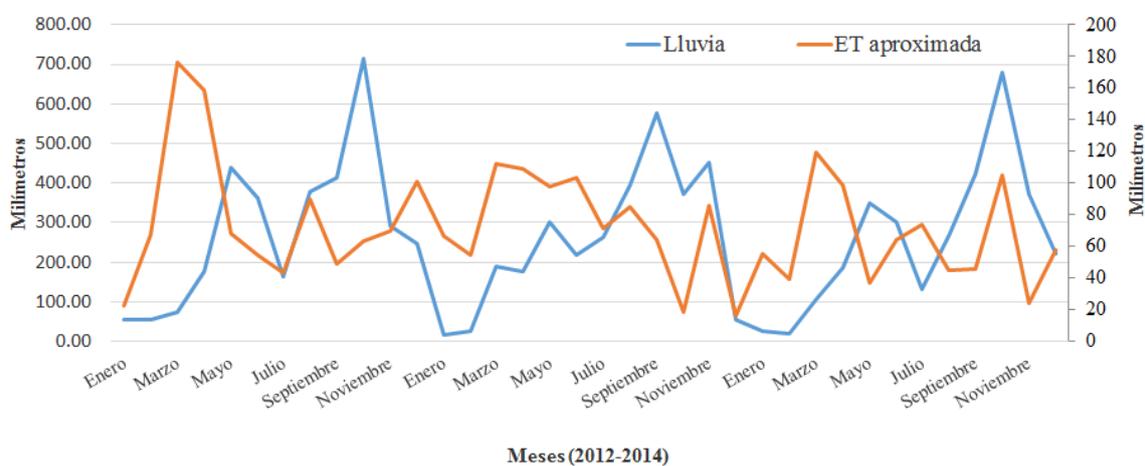


Figura 7. Comportamiento de la evapotranspiración potencial y la precipitación mensual para el área de estudio de enero del 2012 a diciembre del 2014. Elaborado por Méndez y Molina, (2015).

De la *tabla 11*, se resaltan las diferencias entre los periodos de enero-junio a julio-diciembre para los tres años, donde variables como la temperatura, la velocidad del viento y la evapotranspiración poseen valores menores en el primer periodo, mientras

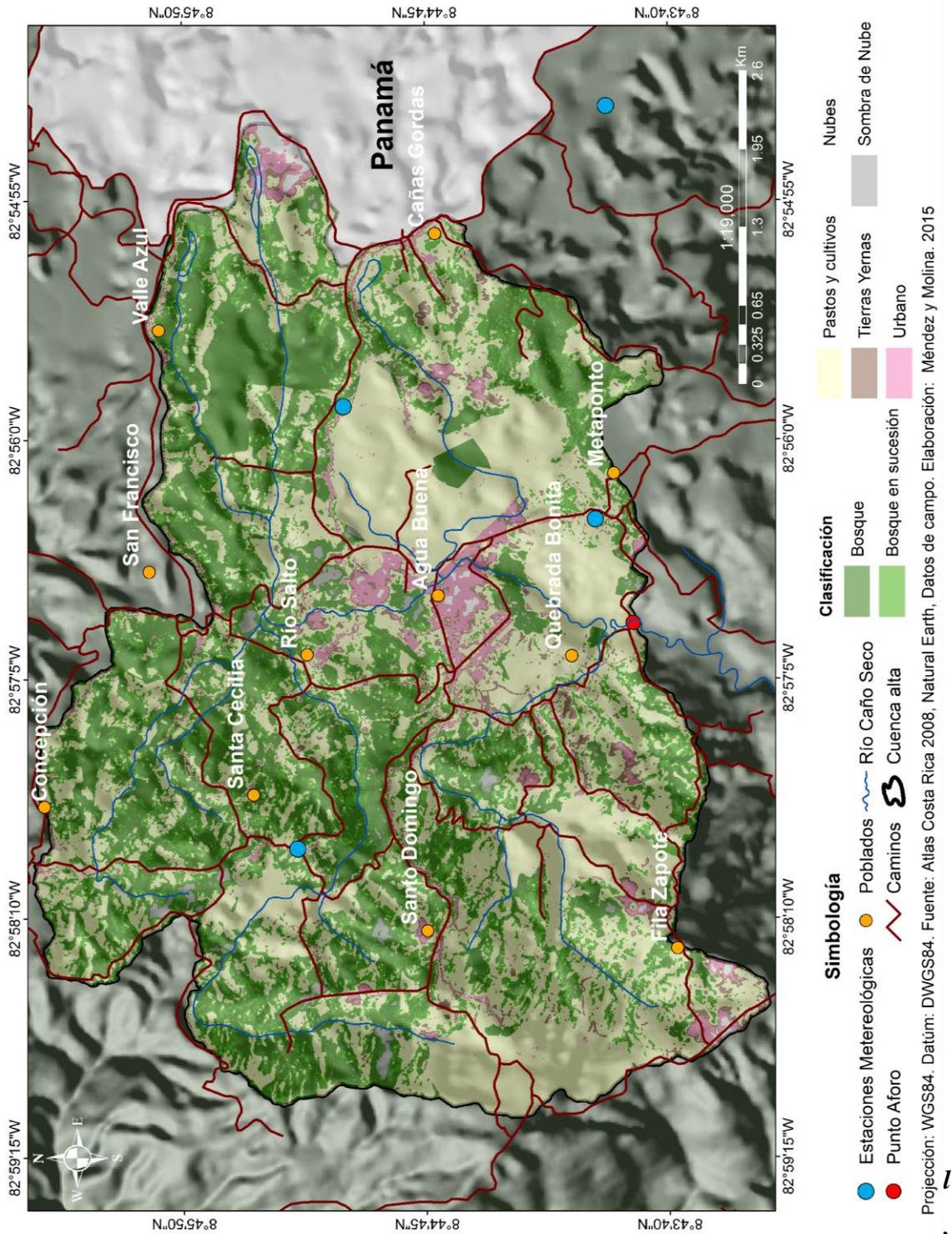
que la humedad, la presión barométrica y las precipitaciones presentan cifras más altas en los periodos de julio-diciembre. En el caso de la precipitación, es importante señalar cómo estas se duplican (de valores de 900-1000 mm 2000-2200 mm) en el periodo julio-diciembre respecto a enero-junio, lo cual ocasiona la saturación de los suelos y, por tanto, la generación de la escorrentía superficial y disminución de los tiempos de concentración y estadía del agua dentro de la cuenca.

Por otra parte, en la *figura 7* se evidencia claramente una estacionalidad lluviosa típica del Pacífico, con dos épocas: una lluviosa (abril-noviembre) y otra más seca (diciembre-marzo), con un descenso en julio (veranillo de San Juan); a su vez, destaca el comportamiento de la evapotranspiración, donde los valores máximos se presentan en épocas secas y se da un descenso en época lluviosa, que presenta los picos máximos entre febrero y marzo de los diferentes años de estudio, lo cual se favorece por la alta radiación solar y la presencia de las brisas marinas características en la región durante la época seca.

2.1.3 Caracterización de la geografía física

En esta sección se abordan algunas características propias de la cuenca relacionadas con la geografía física, se analiza la cobertura de la tierra actual, la geomorfología, la geología, los tipos de suelos y el índice topográfico de humedad y su relación con los tiempos de tránsito del agua en la cuenca.

Al analizar la cobertura de la tierra en la cuenca (*mapa 3*), los datos obtenidos revelan que un 46,4% de la cuenca se emplea para cultivos y pastos, cobertura que facilita la generación de escorrentía superficial, al quedar más expuestos los suelos y, por ende, reducir los tiempos de tránsito del agua en la misma. Las categorías de bosque (25,9%) y bosque en sucesión (19,3%) representan conjuntamente un 45,2% de la cobertura de la tierra, mientras que el uso urbano representa tan solo un 3,8% de la cobertura de la cuenca, que deja entrever la ruralidad de la misma. Por su parte, las tierras yermas poseen un 3,3% y las nubes y sombra de nubes abarcan el 1,3% del total del área de la cuenca.



(2015).

Si bien es posible apreciar que el tamaño del área con cobertura de pastos y cultivos es similar a la cobertura del bosque en la cuenca, es preciso señalar que, en gran medida, la categoría de bosques corresponde realmente a relictos boscosos y árboles semidispersos. Además, algunas de las principales manchas boscosas existentes conciernen a silvicultura para explotación maderera (especialmente pino y eucalipto),

por lo que parte de la cobertura del suelo queda expuesta y se comporta como tierras yermas o pastizales, zonas donde el agua puede escurrir muy fácilmente y reducir la capacidad de infiltración efectiva, así como disminuir los tiempos de estadía del agua en la cuenca.

Ante ello, Arce et al., (1990) refieren que la vegetación potencial que corresponde para la zona de acuerdo con el clima es un bosque muy húmedo tropical, formación que brinda una gran cobertura al suelo, dada su complejidad estructural y florística; sin embargo, este tipo de vegetación se ha modificado en gran parte por la acción antropogénica, que utiliza el terreno para el cultivo de café y pastos. Al mismo tiempo, los charrales que son parte de antiguos terrenos usados por el ser humano ocupan una extensión importante de la cuenca y no ha sido medido de manera cuantitativa.

La zona de estudio se caracteriza por tres tipos de suelos, tal como se aprecia en el *mapa 4*, de los cuales destacan mayormente los andisoles (66,1%) y los ultisoles (33,8%), y en mucha menor medida los entisoles/inceptisoles (0,1%). Los andisoles son descritos por la FAO, (2007) como suelos negros de origen volcánico, que típicamente se encuentran en zonas montañosas, suelos derivados de cenizas volcánicas y que poseen alta porosidad. Tienen altos valores en contenido de materia orgánica, alrededor de un 20%; además, tienen una gran capacidad de retención de agua. Son suelos muy fértiles que permiten una amplia gama de cultivos (*figura 8*). Este tipo de suelos permiten que el agua se infiltre de buena manera; sin embargo, en la cuenca en estudio existe una pequeña capa de arcillas sobre este tipo de suelos que impermeabiliza los suelos y evita una filtración efectiva y genera pequeñas lagunas en algunos de los fondos de valle de medias naranjas.



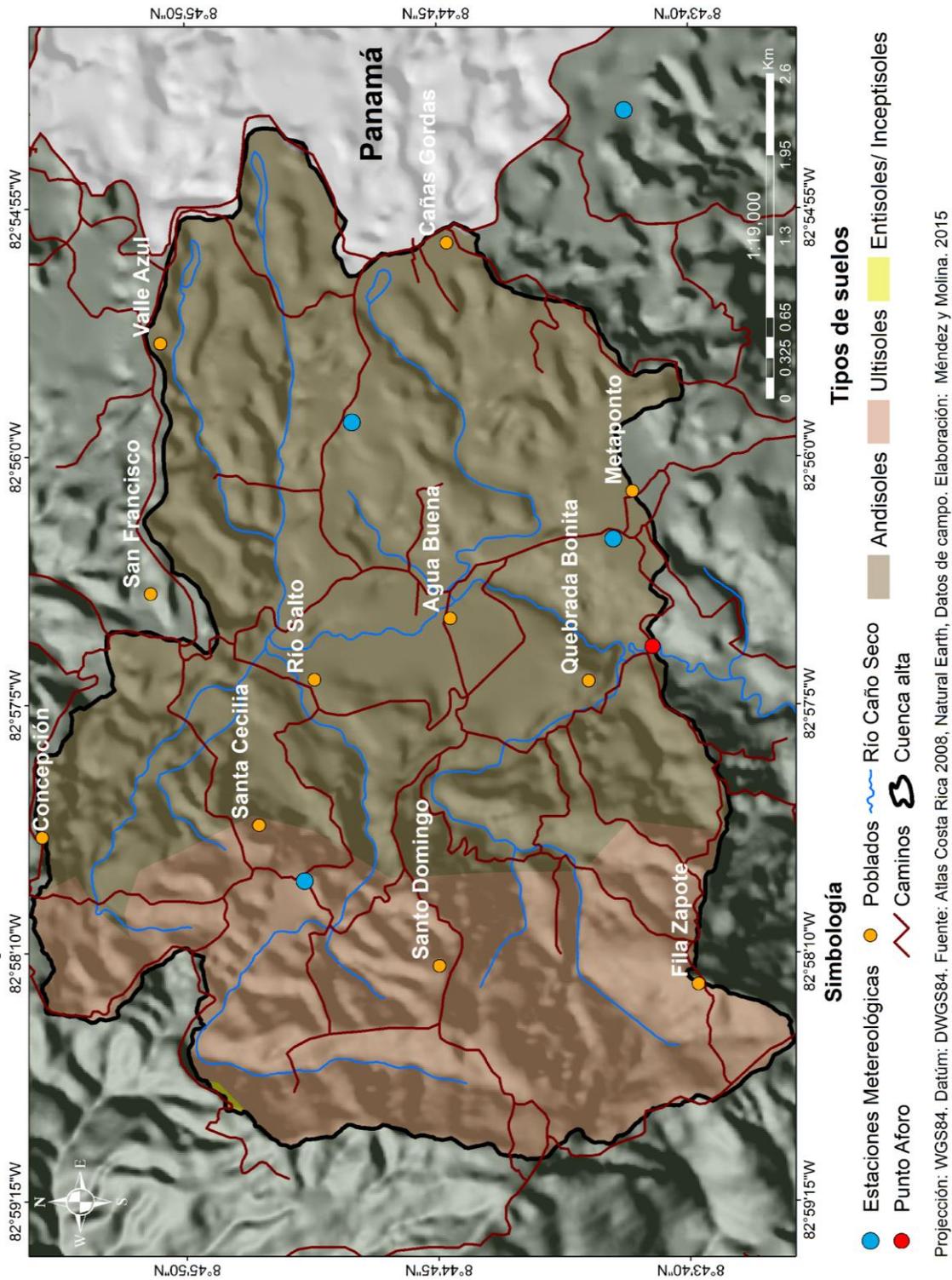
Figura 8. Presencia de andisoles, con uso agrícola, en la cuenca del río Caño Seco. Elaborado por Méndez y Molina, (2015).

Los ultisoles son suelos propios de climas cálidos y húmedos (zonas tropicales), poseen colores rojo y amarillo, que es resultado de la acumulación de óxido de hierro, el cual es insoluble en agua. Los principales nutrientes, como el calcio y el potasio, son deficientes en ultisoles, lo que significa que generalmente no se pueden utilizar para la agricultura sedentaria, sin la ayuda de cal y otros fertilizantes.

Estos suelos se encuentran en el sector oeste de la cuenca, donde las actividades antropogénicas (como la deforestación, la ganadería y la agricultura) han favorecido la compactación de los suelos en algunos sectores, generándose una semiimpermeabilización de ellos y afectando los tiempos de tránsito del agua, al generarse rápidamente los procesos de la escorrentía superficial (*figura 9*).



Figura 9. Presencia de ultisoles, en la cuenca del río Caño Seco. Elaborado por Méndez y Molina, (2015).



Mapa 4. Clasificación de los tipos de suelo dentro de la cuenca del río Caño Seco. Elaborado por Méndez y Molina, (2015).

Los entisoles son los suelos más jóvenes, en los cuales los procesos formadores no han generado aún diversos horizontes. Generalmente, presentan sólo un horizonte

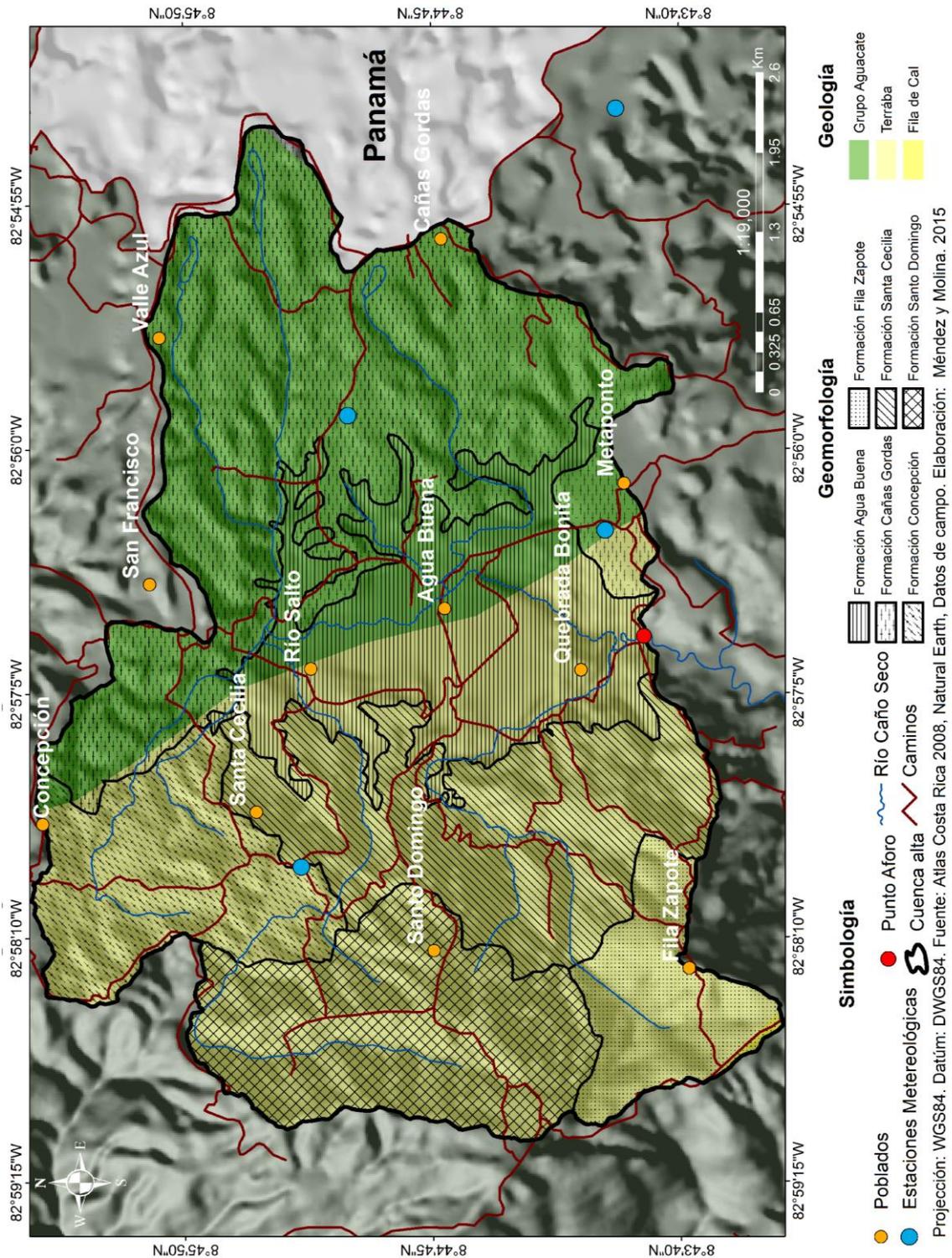
(A), cuya composición es muy parecida al material rocoso que le dio origen y sobre el cual descansa, mientras que los inceptisoles son un poco menos jóvenes que los entisoles, con un desarrollo incipiente de horizontes. No presentan acumulación de materia orgánica, hierro ni arcilla.

En síntesis, se establece que la cuenca presenta suelos fértiles en gran parte de la misma, con buena capacidad de drenaje y retención de agua en los estratos más altos de los perfiles edáficos. Conforme se desciende en los perfiles, es posible encontrar suelos más desarrollados, compactos, arcillosos, con características semiimpermeables. Todo esto conlleva a baja capacidad de infiltración real del suelo y una rápida generación de escorrentía superficial, con lo que se reducen los tiempos de estadía del agua en la cuenca, durante la época lluviosa.

Seguidamente, se analizó de forma general las principales formaciones superficiales y la geología de la cuenca del río Caño Seco, con el fin de tener una perspectiva de sus condiciones y las repercusiones, tanto de la geomorfología como de la geología en los tiempos de tránsito del agua en la cuenca, y en su dinámica. En el *mapa 5* es posible identificar cómo la geología del área se conforma por tres formaciones litológicas, que serán descritas en orden cronológico, con base en su edad de formación, y se tratarán primero las rocas sedimentarias y, posteriormente, las formaciones de origen volcánico. Por su parte, la geomorfología de la zona se compone de seis unidades superficiales, que han sido clasificadas con base en procesos hidrológicos diferenciados y que han dado como resultado diferentes paisajes geofísicos dentro de la cuenca.

2.3.1.1. Formaciones geológicas

La geología de la cuenca se constituye por tres formaciones: formación Térraba, que comprende un 58,9% del área de la cuenca; formación Aguacate, con un 41%, y la formación Fila de Cal, con tan solo un 0,1% del área de estudio.



Mapa 6. Clasificación de la geología y geomorfología de la cuenca del río Caño Seco. Elaborado por Méndez y Molina, (2015).

2.3.1.1.2 Formación Fila de Cal o formación caliza Cajón: Mora, (1979), citado por Arce et al., (1990) describen que esta formación se conforma por calizas someras de

cordón o de plataforma arrecifal de foraminíferos y algas, cuya edad es el Eoceno Superior. Se reconocen dos facies principales asociadas a esta unidad. La primera se define por un sistema macizo de algas incrustantes y foraminíferos, orbitoides de tipo arrecifal, cuyo crecimiento se desarrolló en medios someros, tropical de salinidad normal, circulación abierta y buena oxigenación. La segunda consiste en una facies depositada en el talud del frente arrecifal, compuesta de detritos de algas, foraminíferos, equinodermos y otros fósiles. Es esta facies, la que se ha encontrado en aparente contacto transicional con la formación Térraba y que aflora en el sector noroeste del área de estudio. El espesor de esta formación escasamente supera en esta área los 480 m².

2.3.1.1.3. Formación Térraba: Denyer y Kussmaul, (2000) establecen que la formación consiste en una secuencia compuesta por lutitas, limonitas y areniscas calcáreas de color gris oscuro a negro, en parte con pirita, limolitas areniscas tobáceas, conglomerado y turbiditas. Su edad es del Oligoceno al Mioceno Inferior, determinada con base en su contenido faunístico. Está subdividida en dos unidades: Zapote y Lagarto. La zona de estudio se encuentra en la unidad Lagarto. Esta unidad varía entre 1200 y 1500 m de espesor, se define como la facies proximal de las turbiditas, con predominio de conglomerados y areniscas, y con depósitos de canales turbidíticos.

2.3.1.1.4. Grupo Aguacate o formación Paso Real: Según Arce et al., (1990), esta unidad se compone por rocas volcánicas de la época del Plioceno, está compuesta principalmente por coladas de andesita y basalto, aglomerados, brechas y tobas. Se caracteriza por una serie de depósitos de pie de monte (arenas, guijarros, cantos y bloques), producto de la denudación de la cordillera de Talamanca, con intercalaciones locales de lavas y rocas piroclásticas. Su espesor en esta región varía entre 300 m y 500 m, que disminuye lateralmente. En las regiones de San Vito, Agua Buena y alrededores afloran depósitos de pie de monte, cuyos componentes de granulometría media a gruesa son predominantemente de andesitas con hornblenda.

2.3.1.2. Unidades geomorfológicas:

La zona de estudio se conforma por seis unidades establecidas bajo criterios de topografía, condiciones hidrológicas y su origen, donde se establecieron las formaciones

Agua Buena, que representa un 18,39% del área de la cuenca; Cañas Gordas (33,87%), Concepción (14,29%), fila Zapote (16,66%), Santa Cecilia (10,57%) y Santo Domingo (6,22%), las cuales serán descritas a continuación:

2.3.1.2.1. Unidad Agua Buena: unidad sedimentaria de origen lacustre. Se ubica en el sector central de la cuenca, que es el sitio con las pendientes más suavizadas, lo cual facilita la acumulación de humedad y la divagación del río en algunos trayectos (*figura 10*). Abarca los poblados de Río Salto, Agua Buena y Quebrada Bonita, donde se encuentra el 47% del uso urbano de la cuenca y tan solo el 18% del área total de la misma, lo cual la convierte en la más urbanizada e intervenida de las unidades, además de ser la unidad con los valores más altos en el ITH.

2.3.1.2.2. Unidad Cañas Gordas: corresponde a una zona de lomeríos de baja erosión hídrica. Abarca toda la región sur de la cuenca, que integra los poblados de San Francisco, Valle Azul, Metaponto y Cañas Gordas, hasta el límite de la cuenca con Panamá. Presenta lomas suavizadas en medias naranjas, con fondos de valle semiplanos, debido a acción hídrica de tipo laminar de baja capacidad erosiva.

2.3.1.2.3. Unidad Concepción: se ubica en la parte noroeste de la cuenca, cerca de la comunidad del mismo nombre. Corresponde a una unidad de lomeríos, con una alta erosión hídrica, que ocasiona la formación de pequeñas cárcavas en las laderas y fuertes pendientes en los principales cauces que la drenan.

2.3.1.2.4. Unidad Fila Zapote: se ubica en el sector suroeste de la cuenca, en las inmediaciones de la comunidad de Fila Zapote. Aunque se ubica en una zona con una altitud mayor a gran parte de la cuenca, en ella se encuentran sectores amplios de pendientes suavizadas, que son utilizados para la agricultura y ganadería, con baja capacidad de arrastre de sedimentos por parte de la escorrentía laminar, pero con fuertes pendientes en las cercanías de los cauces.

2.3.1.2.5. Unidad Santa Cecilia: corresponde a laderas de pie de monte de alta erosión hídrica, que propician la formación de cárcavas en las laderas que bordean el sector oeste de la unidad Agua Buena. Presenta zonas de acumulación de materiales que han

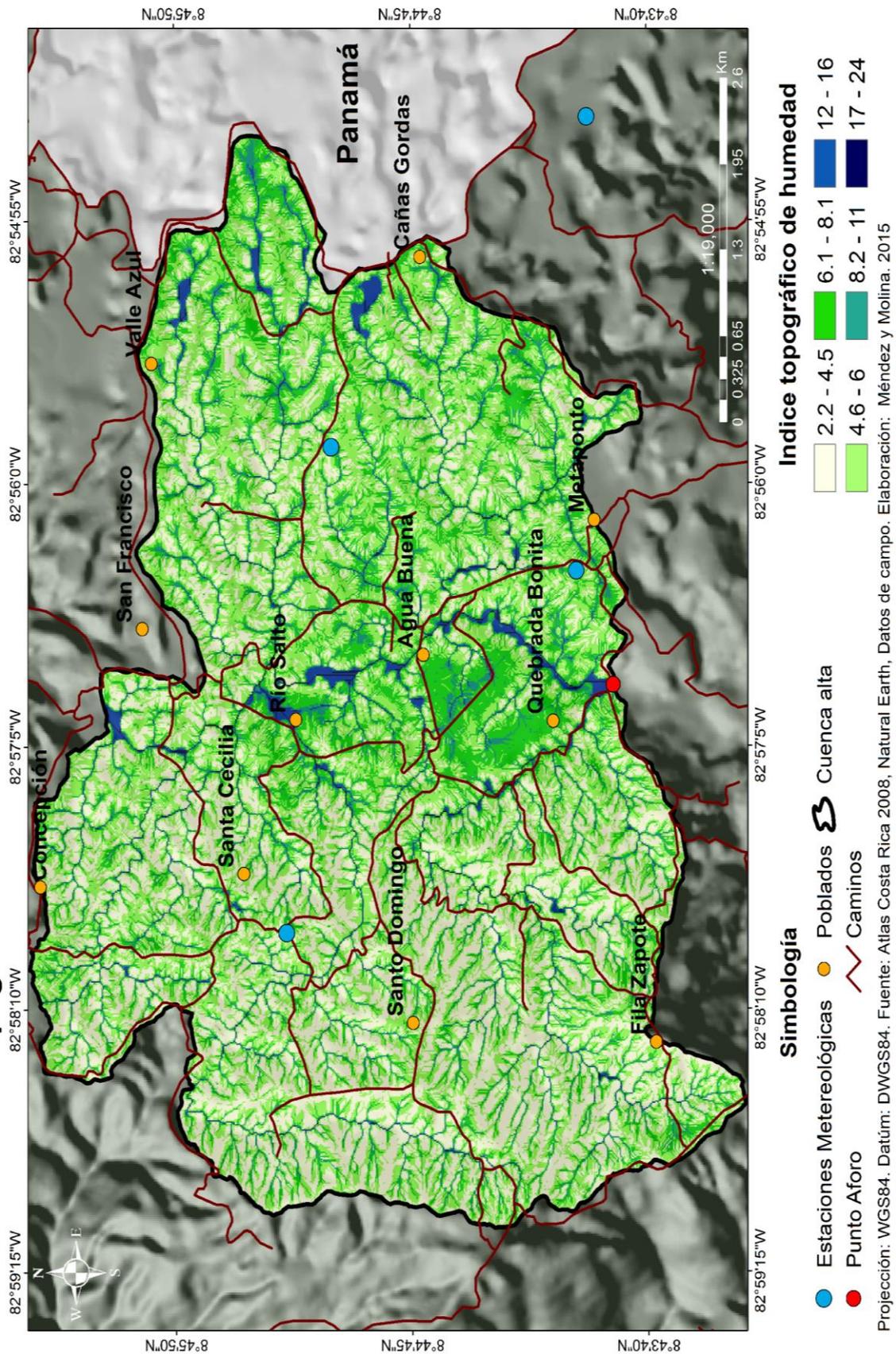
sido erosionados en las partes altas de laderas, que dan origen a pequeños abanicos aluviales en los fondos de valle.

2.3.1.2.6. Unidad Santo Domingo: presenta zonas de fuerte pendiente y alta erosión hídrica. Es el área con las mayores pendientes dentro de la cuenca, lo cual facilita la erosión y la escorrentía laminar. La erosión hídrica ha coadyuvado a la formación de cauces profundos y bien marcados en la topografía de la unidad. Se presenta una gran cantidad de deslizamientos en época lluviosa, principalmente en los márgenes de los principales afluentes que la drenan.

De forma general, la geología y la geomorfología de la cuenca permiten visualizar e identificar zonas donde los tiempos de tránsito del agua se reducen o aumenta, pues por ejemplo la formación Terraba permite una rápida infiltración, que se ve afectada por los suelos y la cobertura del suelo sobre ella, que aceleran la escorrentía superficial y disminuyen la infiltración efectiva. Así mismo, unidades geomorfológicas, como Agua Buena y Cañas Gordas, presentan una baja pendiente y aumentan los tiempos de tránsito, aun cuando se encuentre sobre dicha formación geológica.

Finalmente, en el *mapa 6* es posible observar el resultado para el Índice Topográfico de Humedad, donde se distinguen áreas de acumulación en los sectores planos de la cuenca y en los fondos de valle de los principales cauces. Igualmente, se encuentran áreas de poco almacenamiento de humedad; ubicadas en las partes de mayor altitud y divisorias de la cuenca, donde la pendiente genera una rápida escorrentía superficial, que impide el almacenamiento de agua en estos sectores.

Es importante destacar que los sitios donde más se acumula la humedad corresponden a las cercanías de los poblados Quebrada Bonita y Agua Buena, además de las cercanías de Cañas Gordas. En el caso de los dos primeros poblados, se encuentran en los rellenos generados por un sistema lacustre antiguo y es conocida la problemática con leves inundaciones en la zona, situación que revela la facilidad de acumulación de humedad en la zona y ratifica los resultados obtenidos.



Mapa 7. Índice Topográfico de Humedad de la cuenca alta del río Caño Seco. Elaborado por Méndez y Molina, (2015).

En el caso de Cañas Gordas, se destaca la existencia de pequeñas lagunas en los fondos de valle de las formaciones en medias naranjas y que, si bien hoy en día tiene

sistemas de drenaje, tanto el índice como la evidencia pasada confirman que esos valles son áreas de almacenamiento superficial de las aguas. Otro sector destacable y que se evidencia en el índice corresponde al sector de Río Salto. En ese sitio, es posible encontrar meandros en el río (*figura 10*), debido a que dicha zona es relativamente plana, lo cual disminuye la capacidad de arrastre del río y, por ende, tiende a divagar. Todo ello contribuye a que este sector se convierta en zona de acumulación hídrica y, por ello, se observe de forma notoria en la imagen resultante del ITH.



Figura 10. Evidencia de la presencia de meandros de altura en el río, producto de la acumulación de sedimentos y la disminución de la capacidad de arrastre del río ante el descenso de la pendiente del cauce. Elaborado por Méndez y Molina, (2015).

El índice topográfico de humedad permite visualizar las zonas que, por la pendiente, la dirección de la pendiente y la morfología de la cuenca, son generadoras de escorrentía o permiten la acumulación del agua y, con esto, analizar mejor los tiempos de tránsito del agua en la cuenca. De esta forma, las áreas con valores bajos en el ITH son generadoras de escorrentía y aceleran el tránsito del agua, que disminuyen el tiempo de residencia, mientras que valores más altos representan zonas donde el agua aumenta el tiempo de tránsito del agua en la cuenca.

2.2. Características isotópicas de la cuenca del río Caño Seco

Los datos recolectados, de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$, describen la composición isotópica en la cuenca del río Caño Seco. En este apartado, se analizan los resultados encontrados a partir del procesamiento de datos que se realizó, empezando con los datos de concentraciones de ambos isótopos, tanto en el caudal como en la precipitación, para mostrar su variabilidad en el tiempo y cuáles serían las condicionantes para que dichos isótopos se comporten así dentro de la cuenca. Seguidamente, se analiza la elaboración de la línea meteórica local y su comparación, tanto en la relación con otras líneas meteóricas del país como en los datos de concentración de isótopos $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ en el caudal.

Se estimó, por medio de un modelo gamma de dos parámetros, el tiempo de tránsito del agua, dentro de la cuenca para distintas escalas de tiempo, es decir, en secuencia temporal de datos de dos años continuos se analiza por periodos de un año, seis meses y cuatro meses cada uno, que se desplaza paulatinamente un mes desde el inicio de la línea de tiempo y hasta el final. Se encontró una correlación alta con el resultado del tiempo de tránsito en la cuenca con la variable climatológica “dirección del viento”, debido a las condiciones de humedad determinadas por la estacionalidad climática y, en especial, la cercanía con la zona de convergencia intertropical, que influye directamente en los TT en la cuenca.

2.2.1. Variaciones temporales de las concentraciones isotópicas ($\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$) en precipitación y caudal

El tiempo de tránsito varía según la estación climática, ya sea seca (de diciembre a abril) o la lluviosa (de mayo a noviembre). Además, los procesos de evaporación, evapotranspiración, temperatura, radiación, infiltración y escorrentía del flujo muestran comportamientos diferenciados, que dependen de la región, lo que causa resultados interanuales e intraanuales distintos en el sitio donde se realizan las mediciones isotópicas ($\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$). En medios intertropicales y tropicales, esas variaciones son pronunciadas, para el caso de Costa Rica se evidenciaron a través de análisis locales que se han realizado y que demuestran que las concentraciones isotópicas se ven

condicionadas bajo distintos factores (climáticos, topográficos, geológicos, edafológicos, uso de la tierra) que causan contrastes significativos entre distintas cuencas.

La cuenca del río Caño Seco posee una variación notoria, en los datos de concentraciones isotópicas ($\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$), ya sea en la precipitación como en el cauce (*figuras 11 y 12*), en los cuales se muestran dos periodos muy diferenciados que están determinados por la estacionalidad climática que existen en el país. La serie de tiempo mensual muestra datos recolectados, desde mayo del 2012 hasta setiembre del 2014, lo cual evidencia claras diferencias regionales dentro del ciclo anual, que destaca un contraste en relación con la estación seca contra la estación lluviosa y, a la vez, una respuesta interanual en las variaciones climáticas.

La media en las $\delta^2\text{H}$ oscila en -56,462 ‰, lo cual indica que es un sitio enriquecido en cuanto a este isótopo; el mismo caso sucede para el $\delta^{18}\text{O}$, donde su media oscila en -7,914 ‰ (*tabla 12*).

Variable	Mínimo	Máximo	Media	Desv. típica
$\delta^2\text{H}$ en precipitación	-135,91	-1,46	-56,46	17,03
$\delta^2\text{H}$ en el caudal	-79,37	-21,88	-62,34	6,13
$\delta^{18}\text{O}$ en precipitación	-18,17	-0,89	-7,91	2,07
$\delta^{18}\text{O}$ en el caudal	-11,49	-1,27	-9,07	1,05

Tabla 11. Estadísticas de las $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$, cuenca del Caño Seco, Costa Rica. 2012-2014. Elaborado por Méndez y Molina, (2015).

Cabe destacar que los valores de concentraciones obtenidos en la cuenca del río Caño Seco son negativos, debido a que se tomó el valor de agua oceánica, el cual corresponde a 0 para ambos isótopos. Este dato está asignado por V-SMOW (*Vienna-Standard Mean Ocean Water*), donde la OIEA lo toma de igual forma como estándar, para describir estos isótopos. Cuando los valores de isótopos se tornan negativos, significa que la muestra tiene menor concentración del isótopo pesado; esto pasa conforme las aguas meteóricas se adentran en el sector continental y, junto con este factor, también se ven afectadas por efectos como la evaporación.

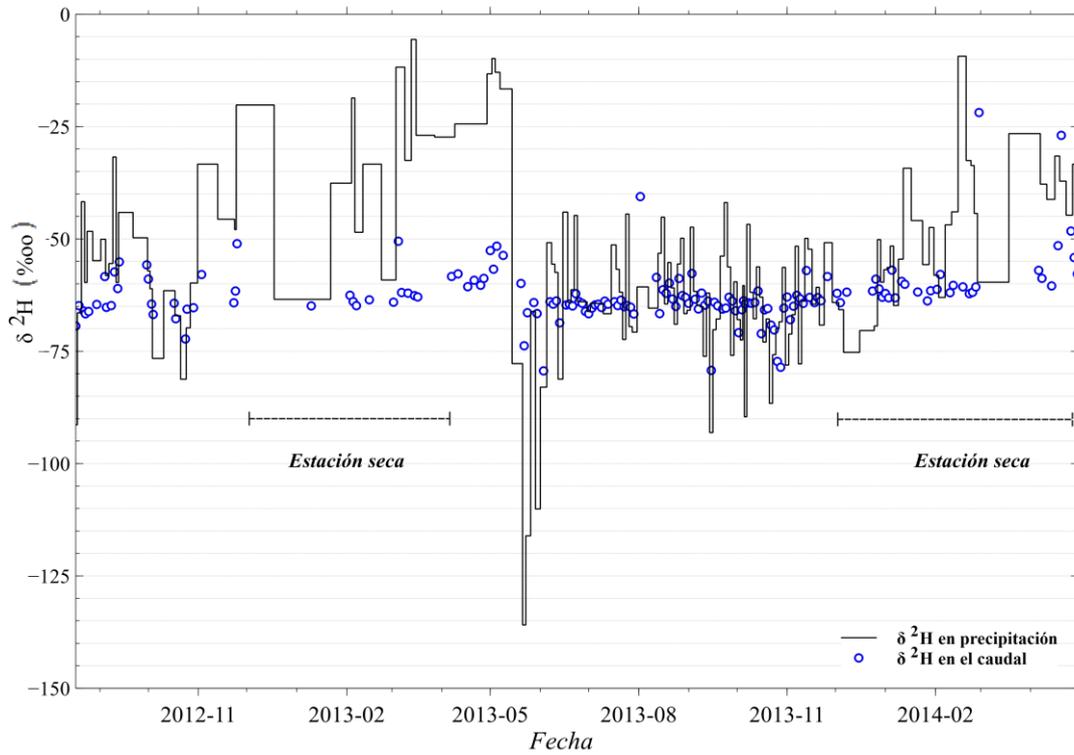


Figura 11 Se muestran $\delta^2\text{H}$ en la precipitación y en el caudal desde septiembre del 2012 hasta abril del 2014. Elaborado por Méndez y Molina, (2015).

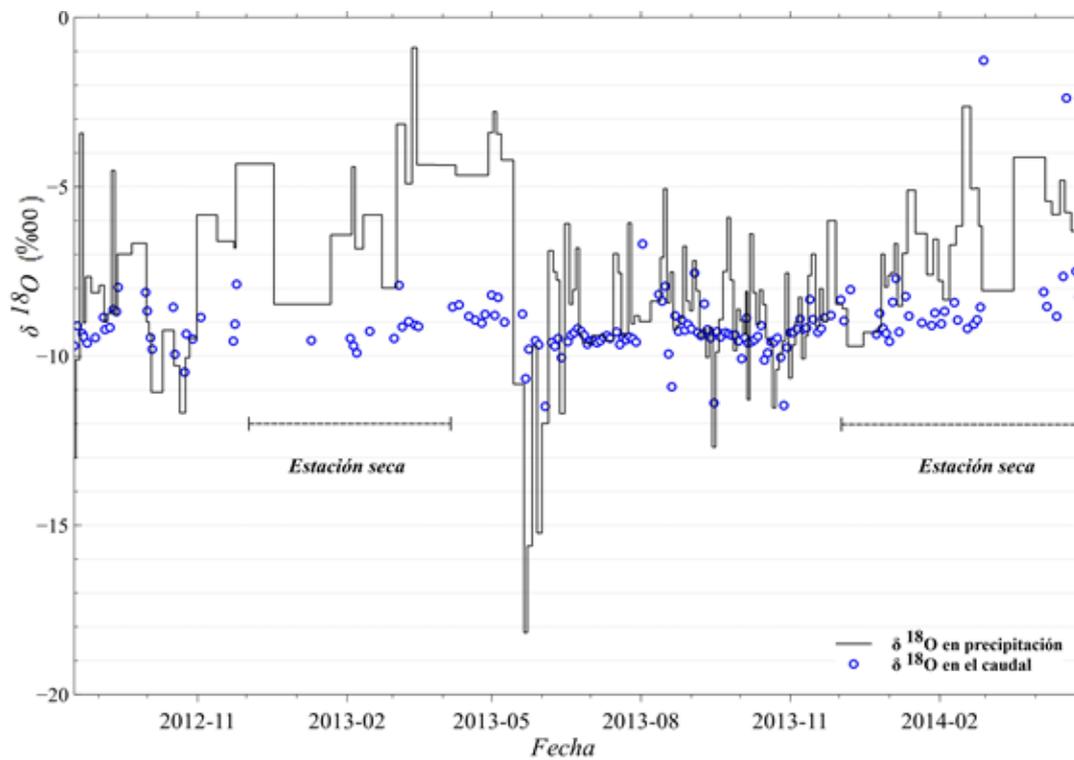


Figura 12 Se muestran $\delta^{18}\text{O}$ en el caudal del río Caño Seco, desde setiembre del 2012 hasta abril del 2014. Elaborado por Méndez y Molina, (2015).

De igual manera, las concentraciones isotópicas en el caudal son contrastadas para cada una de las estaciones. Durante la estación seca, se registraron dos periodos donde $\delta^{18}\text{O}$ llega hasta los $-1,27\text{‰}$ para el 28 de febrero del 2014 y $-2,38\text{‰}$ para el 4 de junio del 2014, que son los registros donde hay mayor enriquecimiento en este isótopo, mientras para $\delta^2\text{H}$, al tener una correlación directa con $\delta^{18}\text{O}$, presenta igualmente registros altos, uno de $-21,88\text{‰}$ y de $-26,96\text{‰}$, en relación con las fechas anteriores.

Estos datos implican enriquecimiento de las concentraciones en el caudal durante periodos secos, debido a escasez de lluvias y altos niveles de evapotranspiración. Mientras, en periodos lluviosos, los registros llegan hasta $-79,37\text{‰}$ en $\delta^2\text{H}$ (para el 3 de junio del 2013), donde coincide con algunos de los registros más altos de precipitación, que es de 59,3 mm, y una de las concentraciones más bajas de $\delta^2\text{H}$ en la precipitación, que fue de -83‰ (*anexo 3*).

Esto refleja que el aporte de aguas en el cauce fue directamente por las fuentes de lluvias para ese día y no de aguas subterráneas que hayan aportado significativamente en el cauce. Las concentraciones medias (*tabla 12*) de $\delta^2\text{H}$ en el cauce refleja empobrecimiento de este isótopo y los aportes vienen de fuentes subterráneas, mientras que en los eventos extremos, esas contribuciones fueron de las lluvias.

2.2.2. Línea meteórica

Se encontró una variación de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ para la precipitación entre $-18,17\text{‰}$ y $-0,89\text{‰}$ y entre $-135,91\text{‰}$ y $-1,46\text{‰}$, respectivamente, y se presentó una diferencia lineal dada por la ecuación $\delta^2\text{H} = 7,96\delta^{18}\text{O} + 6,57$ ($r^2 = 0,94$), expresión que representa la línea meteórica local para la cuenca del río Caño Seco (LML), (*figura 13*). Al realizar un análisis de las rectas, se observan ligeras variaciones en la pendiente ($-0,04\text{‰}$) y la constante ($-3,43\text{‰}$), entre la expresión para la LML y la expresión para la línea meteórica mundial (LMM), dada por Craig (1961) ($\delta^2\text{H} = 8\delta^{18}\text{O} + 10$), y una diferencia de $-0,21\text{‰}$ en la pendiente y $-6,5\text{‰}$ en la constante, conforme con la asignada por

Rozanski K., Araguas-Araguas, L., Gonfiantini, R., (1993) ($\delta^2\text{H} = 8,17 (\pm 0,07) \delta^{18}\text{O} + 13,07 (\pm 0,65)$).

Por otra parte, al comparar la LML y las líneas meteóricas para Costa Rica (LMCR) construidas por Sánchez et al., (2013), dada por la ecuación $\delta^2\text{H} = 8,17 \delta^{18}\text{O} + 12,27$ ($r^2 = 0,98$; $n = 679$) y la creada por Reynolds-Vargas, (2009), con la expresión $\delta^2\text{H} = 8,33 \delta^{18}\text{O} + 14,09$ ($r^2 = 0,993$; $n = 397$, lluvias mensuales $> 20\text{mm}$). En este caso, la pendiente de la LML varía respecto a la de Sánchez et al., a razón de $-0,21\%$ y $-5,7\%$ en su constante, mientras que para la ecuación dada por Reynolds-Vargas, la desviación se da en torno a $-0,37\%$ en la pendiente y $-7,52\%$ en su constante.

Existe una similitud entre las ecuaciones de la LMM dada por Rozanski et al., (1993) y la de Sánchez et al., (2013) donde las pendientes de las rectas son iguales y la variación en la constante es de $-0,8\%$, diferencia atribuible al efecto localidad.

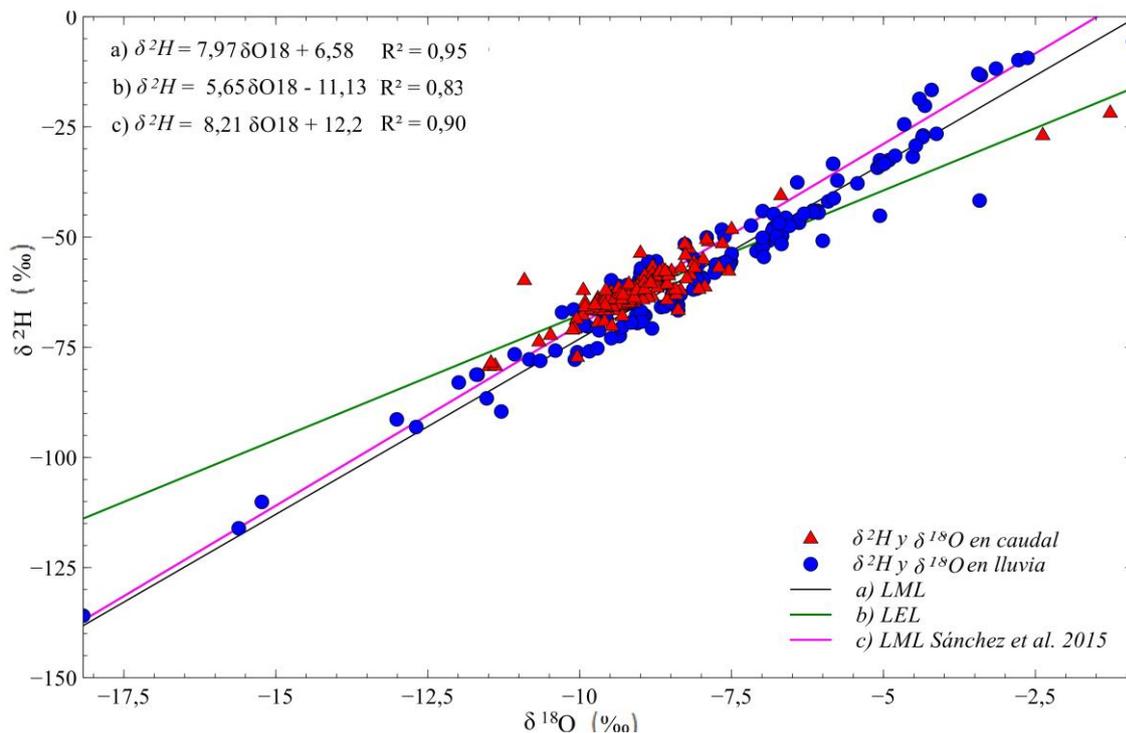


Figura 13 Línea meteórica local para la cuenca del río Caño Seco, periodo de estudio 05/2012 al 08/2014, $n=471$. Elaboración: Méndez y Molina, (2015).

La precipitación y otras aguas que no han sufrido evaporación (como la mayoría de aguas subterráneas) caen a lo largo de la LML, la cual tiene una pendiente cercana a

8 y que, como se observó en los datos previamente analizados, se muestra que la pendiente ronda cerca de la LMM propuesta por Craig, (1961).

Estos contrastes evidentes en las pendientes y constantes indican, de la misma manera que las concentraciones isotópicas, las variadas fuentes de precipitación que llegan a los distintos sitios analizados previamente y que están condicionadas por la ubicación geográfica y la escala de análisis, la cual determina las respuestas hidrológicas para cada uno de ellos, además de variables geológicas, geomorfológicas y topográficas que, de igual forma, influyen en las concentraciones isotópicas locales.

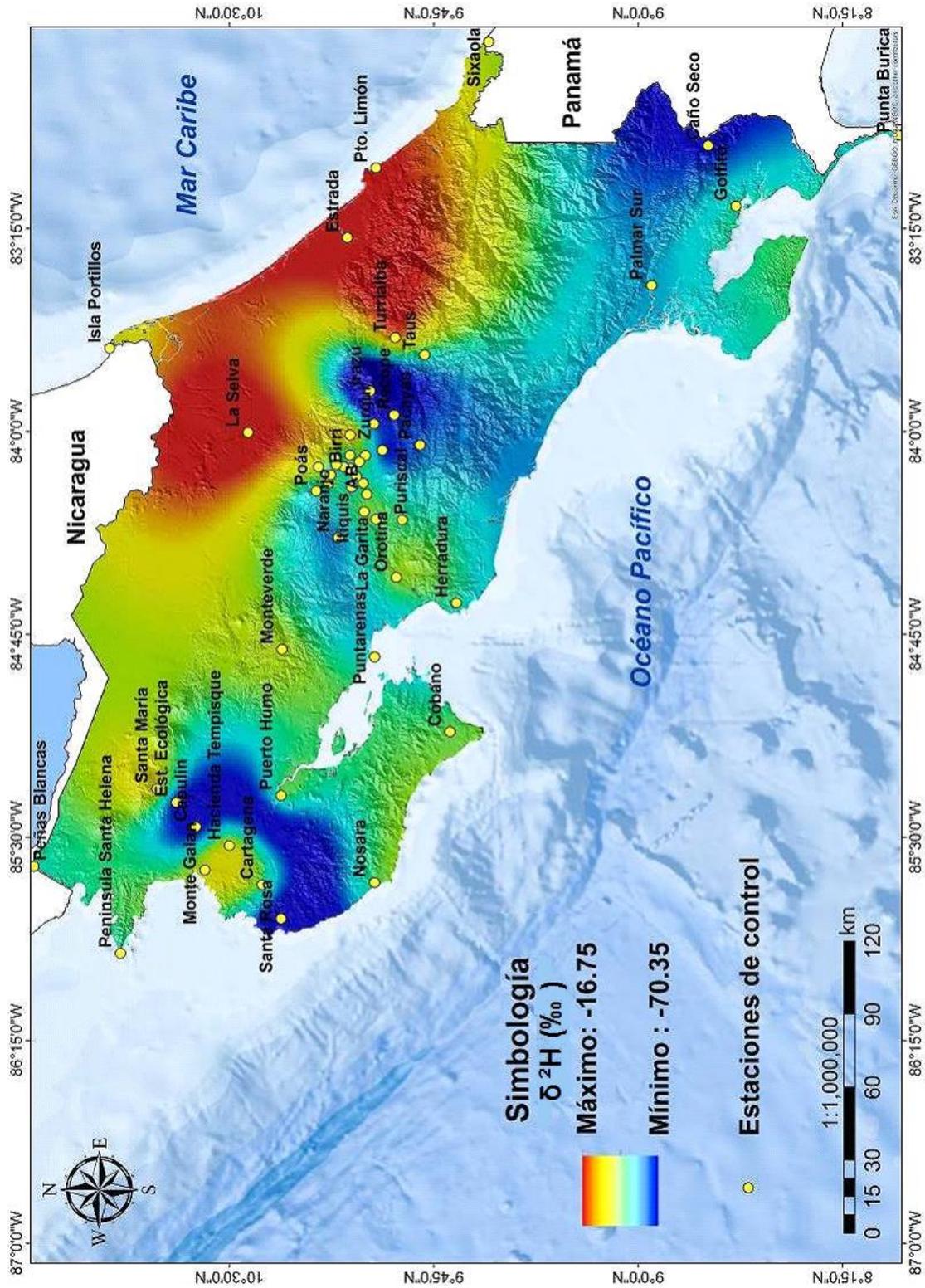
Cuando las aguas meteóricas se han sometido a la evaporación, muestran un enriquecimiento sistemático en $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$, lo que resulta una divergencia de la LML en relación con la línea de evaporación local (LEL) (*figura 13*), cuyas pendientes son menores a 8 y oscilan entre el rango de 4 a 6 (Gibson, J.; Bursey, G., y Edwards, T., 1993). Para el caso de Caño Seco, la pendiente de la LEL es de 5,6, dato que se encuentra dentro del rango estimado por Gibson, J.; Birks, S., y Edwards, T., (2008) para latitudes medias, al cual se le asignó un valor para la pendiente de la LEL entre 5 y 6.

Al agrupar los datos de caudal con sus respectivas concentraciones de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$, se obtuvo el resultado de la LEL. La intercepción definida entre la LEL y la LML proporciona una estimación útil de la precipitación media ponderada (δp) de la precipitación anual en la cuenca. El desplazamiento a lo largo de la LEL de la δp varía dentro y entre los cuerpos de agua, en respuesta a la variación del balance hídrico (Gibson et al., 1993).

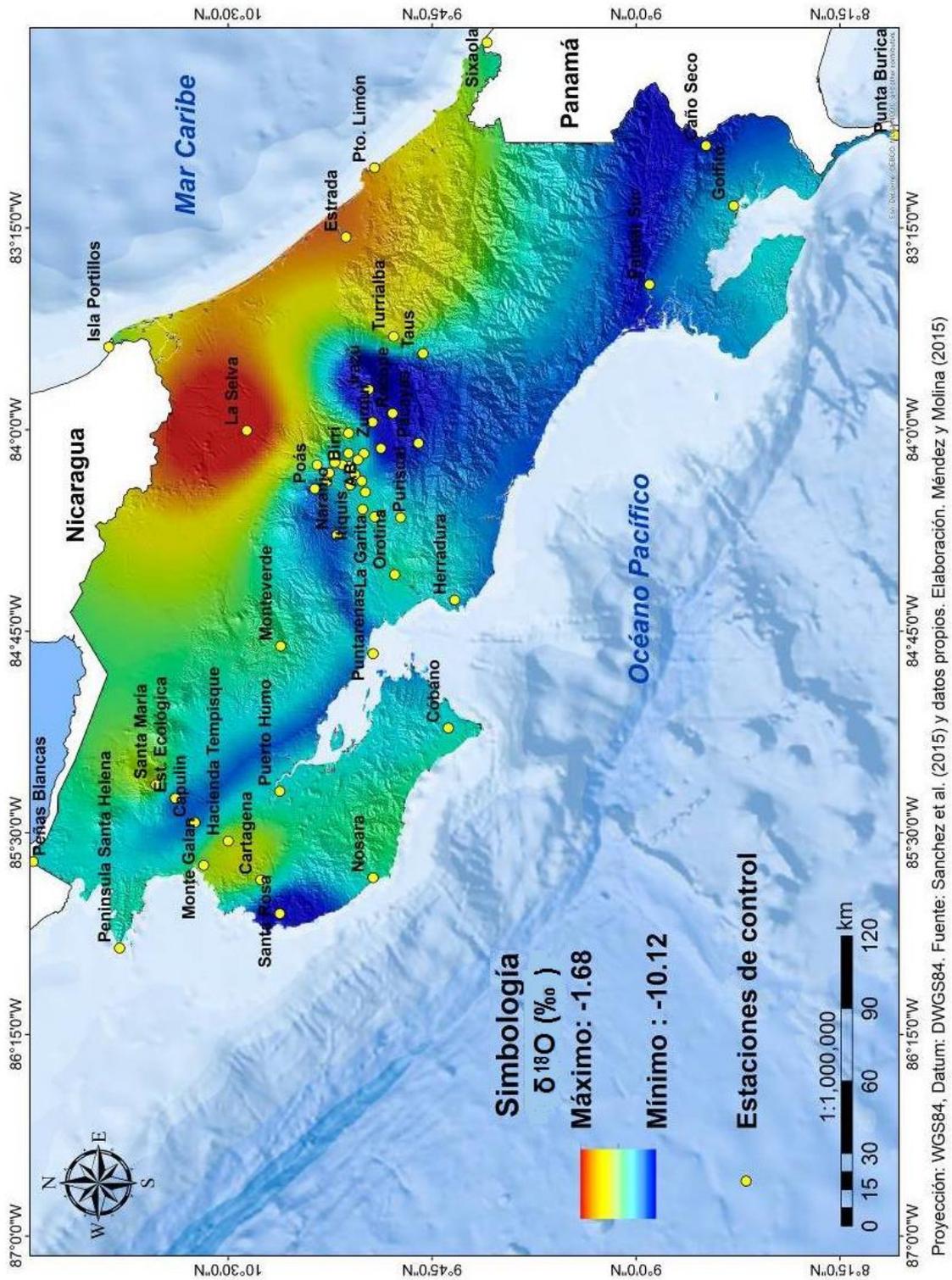
La ecuación de la LML corresponde a $\delta^2\text{H} = 7,96 \delta^{18}\text{O} + 6,57$, mientras para la LEL es $\delta^2\text{H} = 5,6546 \delta^{18}\text{O} - 11,137$ (*figura 13*), proporciona valores de δp de las $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ respectivamente de -8,1 y -60,1. Esto refleja un fuerte fraccionamiento, debido a la evaporación en una fuente de agua que contribuye al caudal.

Los estudios realizados por Sánchez et al. (2013) arrojan una serie de datos de gran importancia, entre los que destacan las concentraciones de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ para 48 localidades del país (*anexo 2*), las cuales presentan LML particulares y que dieron como

resultado la LML para Costa Rica. A estos datos se les anexó las concentraciones encontradas en el presente estudio y se generó una interpolación de las $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$. Los resultados se presentan en el mapa 7, donde se puede apreciar claramente la distribución espacial de ambos isótopos y la influencia de la topografía en la cuenca.



Mapa 8. Distribución espacial del $\delta^{2}H$ (‰) para Costa Rica, respecto a 49 estaciones de control (anexo 2). Elaboración: Méndez y Molina, (2015).



Mapa 9. Distribución espacial del $\delta^{18}\text{O}$ (‰) para Costa Rica, respecto a 49 estaciones de control (anexo 2). Elaborado por Méndez y Molina, (2015).

En los *mapas 8 y 9* es posible apreciar que la variación en la composición isotópica de las precipitaciones, con respecto a la elevación, no es consistente a lo largo del país, lo que indica un sistema complejo en la distribución y las fuentes de las precipitaciones, donde, por ejemplo, en la vertiente del Caribe hay un evidente efecto orográfico, mientras que en el Pacífico Norte se da un descenso considerable de las precipitaciones, pues los sistemas montañosos no permiten el paso de humedad desde el Caribe. En el Pacífico Central y Sur las concentraciones son más estables, tanto en $\delta^{18}\text{O}$ como en $\delta^2\text{H}$, por lo que el origen de estas lluvias está principalmente en los vientos provenientes del Océano Pacífico, lo que da como resultado, para la cuenca del río Caño Seco, concentraciones más empobrecidas para ambos isótopos respecto a la distribución total del país.

2.2.3. Modelo matemático para estimar el tiempo de tránsito del agua

La estimación del tiempo de tránsito del agua (TT) en la cuenca del río Caño Seco se realizó con la ayuda de isótopos estables del agua, $\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$, variables climáticas (lluvia y evapotranspiración) y un modelo matemático de tipo gamma de dos parámetros. El modelo se aplicó para toda la línea de tiempo, que consta de dos años; además, para obtener mayor detalle en los resultados del TT, se corrió el modelo a escalas temporales menores, por lo tanto, se obtuvieron resultados para cada año, seis meses y periodos de cuatro meses, esto a lo largo de los dos años de registro de datos (*figura 15*).

La función del modelo matemático consistió en tomar como entrada las concentraciones de $\delta^2\text{H}$ en las muestras de lluvia (las cuales son muy variables en el tiempo) y las transforma en una salida más constante, debido a diferencias propias de las cuencas, tales como las características físicas (topografía, suelos saturados y no saturados, geología, geomorfología) y procesos hidrológicos complejos. El producto de este modelo representa el tiempo de tránsito de la cuenca Caño Seco, para un periodo de dos años (*figura 14*).

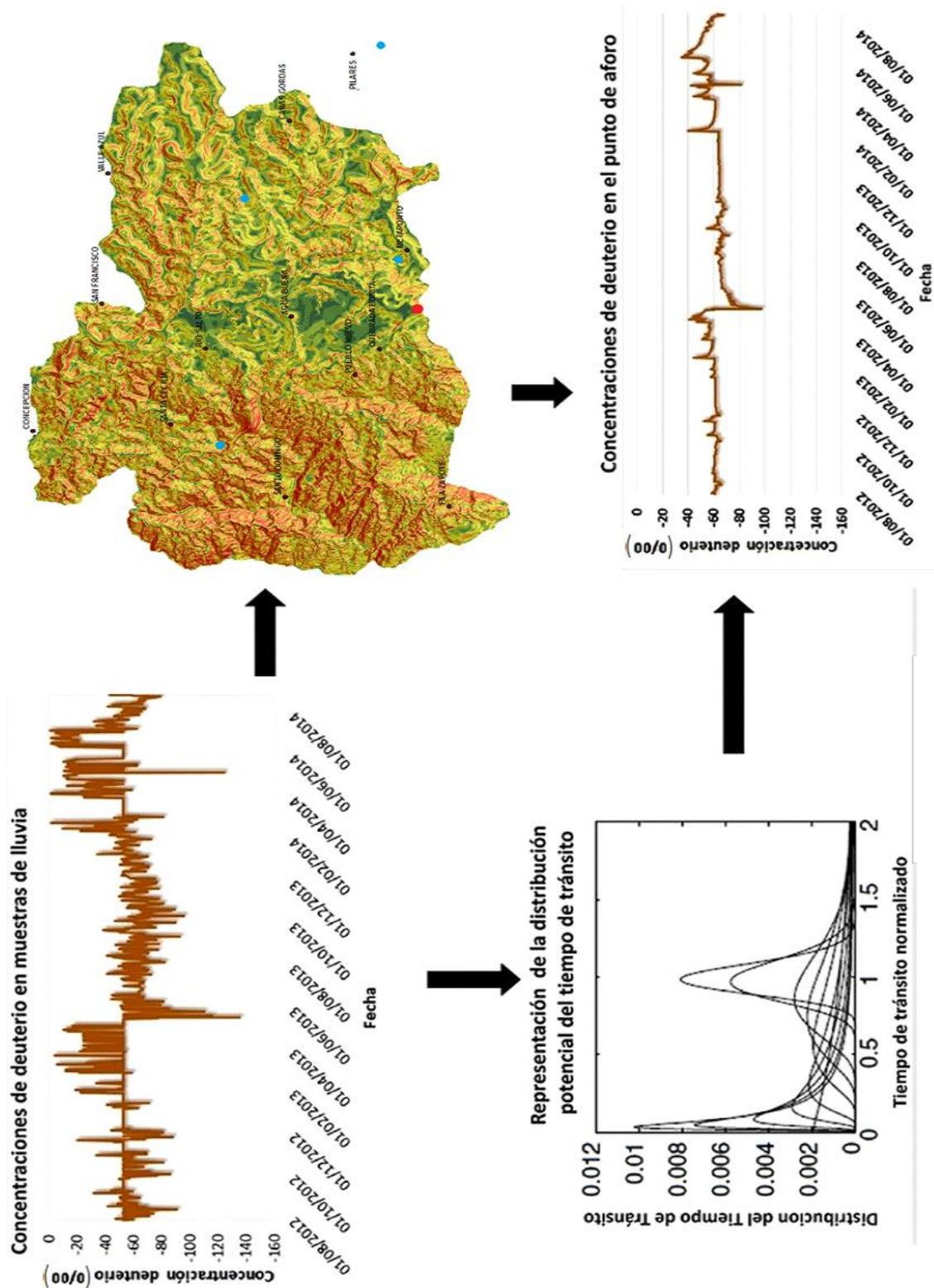


Figura 14 Transformación de una entrada variable (concentraciones de δ^2H en la precipitación) en una salida más constante (tiempo de tránsito), debido a procesos hidrológicos complejos en una cuenca, como concepto básico del modelo matemático gamma, para un periodo de 4 meses. Elaboración: Méndez y Molina, (2015).

Uno de los principales resultados de esta investigación es confirmar que el TT es muy variable en el tiempo. Los datos muestran dos periodos muy contrastados (*figura 15*), los cuales está determinados por la variabilidad climática. El primero va de agosto del 2012 hasta mayo del 2013, que corresponde a un periodo seco, con alta evapotranspiración y altos valores para el TT en la cuenca, y que rondan en promedio los 295 días. El segundo va de junio del 2013 a agosto del 2014 y presenta una mayor precipitación, lo cual se ve reflejado en un menor TT, promediado en 9,6 días.

Además de la marcada diferencia entre las estaciones, se puede distinguir que a la vez se da una alta variabilidad entre estos periodos, donde cada cuatro meses se obtienen promedios de 185 días para el TT en el periodo seco y 15 días en el periodo más lluvioso, lo que demuestra que el tiempo de tránsito no es uniforme en el tiempo (*tabla 13*).

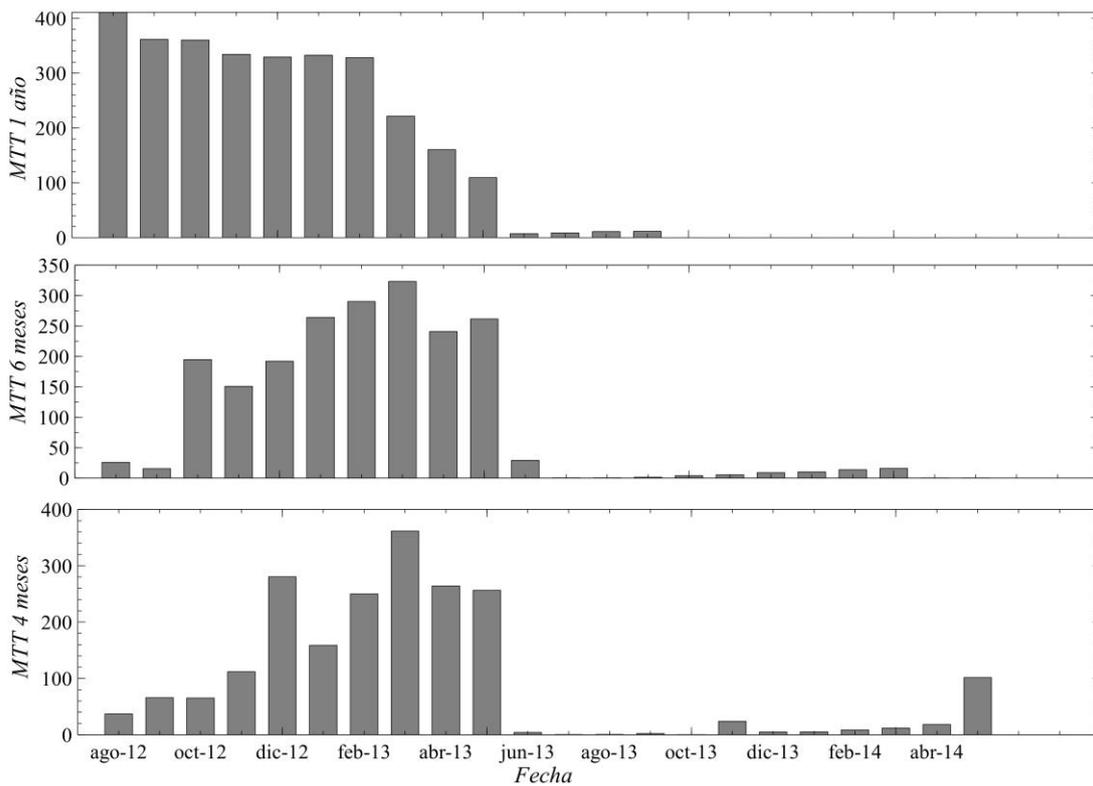


Figura 15 Tiempo de tránsito calculado con diferentes periodos para fines de comparación. Periodo 2012-2014. Elaborado por Méndez y Molina, (2015).

Variable	Mínimo	Máximo	Media	Desv. típica
MTT (4m)	0,33	361,55	92,45	115,18
MTT (6m)	0,39	323,15	102,47	120,29
MTT (1 año)	7,18	411,03	213,39	156,40

Tabla 13. Comparación de los tiempos de tránsito en días. Cuenca del Caño Seco, Costa Rica. 2012-2014. Elaborado por Méndez y Molina, (2015).

Al tomar el TT calculado con una escala de cuatro meses para toda la línea de tiempo, se obtiene en mayor detalle los dos periodos interanuales e intraanuales contrastados y determinados por variables climáticas, como el origen de la humedad, la precipitación y las estaciones (seca y lluviosa). Estas últimas son mucho más evidentes en periodos intraanuales (*figura 16*). Para el periodo de marzo a agosto del 2013, se registró lluvias inferiores al promedio, con tasas de evapotranspiración elevadas y de igual forma TT largos, mientras que para el periodo 2014 TT eran cortos. Al analizar estos datos se evidencia que no hay correlación directa entre la lluvia (*figura 16*) y la evapotranspiración con el TT, sino que influyen otras variables que representan mejor la distancia de las rutas del flujo, el gradiente o tasas de cambio de la red de drenaje, tales como aquellas que representan la organización del paisaje (uso de la tierra, geología, geomorfología, topografía) y, por lo tanto, controlan el transporte a gran escala (McGuire et al., 2005).

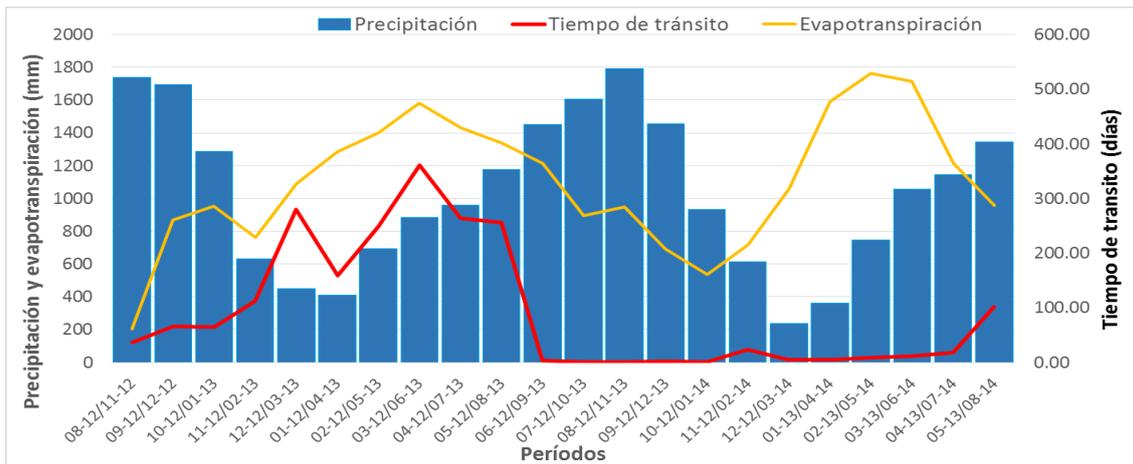


Figura 16 La figura muestra la dinámica de las lluvias y la evapotranspiración en relación con el TT por periodos de cuatro meses de agosto del 2012 hasta setiembre del 2014. Elaborado por Méndez y Molina, (2015).

Tal como se aprecia en la **figura 17**, el tiempo de tránsito en la cuenca del Caño Seco y la dirección de los vientos tienen una correlación alta, de 0,82, debido a que los vientos provienen del suroeste (240 grados acimut) de nuestro país, y cuando esto coincide con los meses de marzo a setiembre, ascienden desde la zona de convergencia intertropical y arrastran humedad en ellos, lo que causa un aumento en las precipitaciones en la cuenca y, por ende, un descenso en el tiempo de residencia del agua, especialmente cuando los suelos ya están saturados.

En la época entre octubre y abril, los vientos provienen desde el sur (180 grados acimut), momento en que la zona de convergencia intertropical se encuentra más alejada de nuestro país y, por tanto, al llegar a la cuenca, los vientos presentan condiciones secas o con cantidades de humedad muy bajas, lo que ocasiona el descenso en las precipitaciones y el aumento en los tiempos de estancia del agua en la zona de estudio.

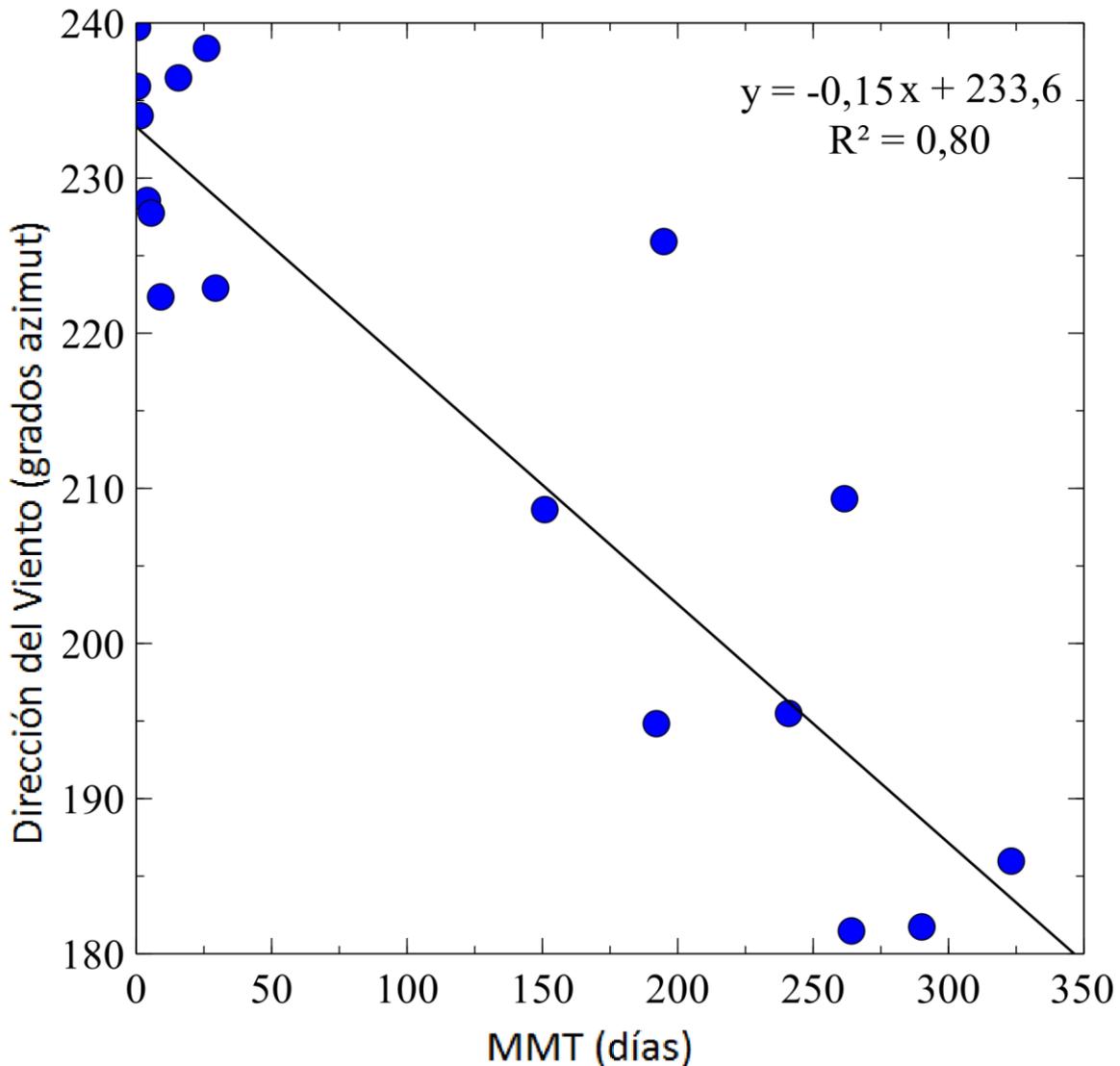


Figura 17 Relación entre la dirección del viento y el tiempo de tránsito, con un nivel de correlación alto. Elaborado por Méndez y Molina, (2015).

2.2.4. Comparación del tiempo de tránsito de $\delta^2\text{H}$ en relación con el $\delta^{18}\text{O}$

La relación que existe entre los TT de $\delta^2\text{H}$ en relación con los de $\delta^{18}\text{O}$, es directa. Para este caso, también se utilizó la serie de tiempo a 4 meses, que permite tener mayor detalle de la distribución de los TT en la cuenca. De igual forma que el $\delta^2\text{H}$, se identificó que el $\delta^{18}\text{O}$ se ve condicionado por la estacionalidad climática de la zona, pues al ver su comportamiento a través del tiempo en estudio, se demuestra que existe una diferencia marcada entre la época seca y la época lluviosa, lo que es una

2.2.5. Parámetros alfa-beta y rendimiento del modelo en la estimación del tiempo de tránsito del agua

Para la estimación del tiempo de tránsito, se utilizaron los parámetros alfa (α) y beta (β), brindados por el modelo matemático. El primero corresponde a un parámetro de forma y el segundo a uno de escala, respectivamente; con la multiplicación de cada uno, se obtiene el MTT. El parámetro α posee nula relación con la intensidad de precipitación y da inversamente proporcional en relación con el parámetro β , pero sí tiene relación con la densidad de drenaje, topografía, características del paisaje y suelos. Para el caso del parámetro β , la relación que tiene con la intensidad de precipitación se utilizó para expresarla como una función variable en el tiempo, dentro del modelo de parámetros concentrados (Hrachowitz et al., 2010).

Para efectos de la cuenca del río Caño Seco, la **figura 19** muestra los parámetros α y β , utilizando las estimaciones realizadas al dividir los dos años de análisis a cada cuatro meses. Esto demuestra la variabilidad climática, tanto a nivel intraanual como interanual, en la cuenca, lo que demuestra de esta forma que los TT dentro de la cuenca se ven influenciados por la estacionalidad climática que afecta al sitio de estudio.

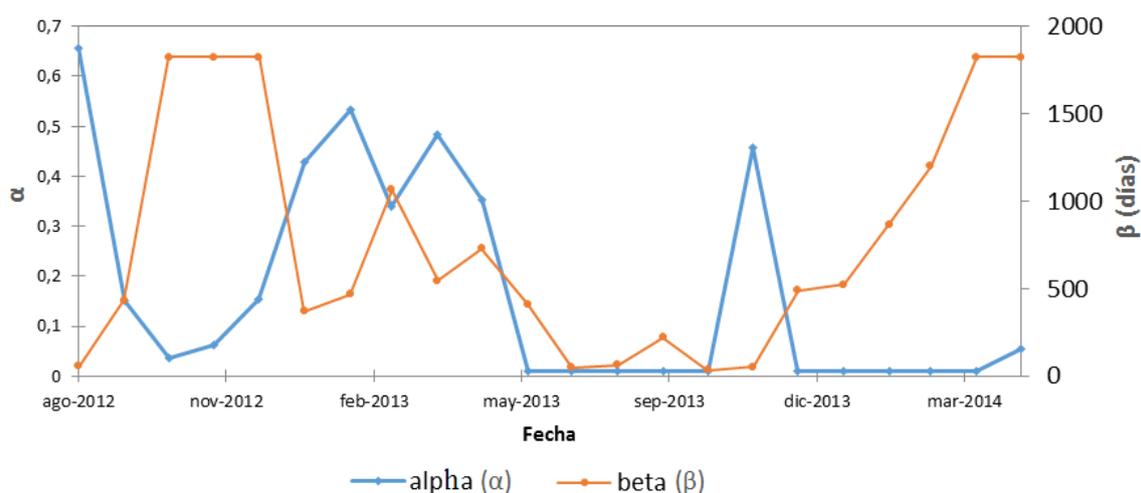


Figura 19 Parámetros α y β utilizados para la estimación del tiempo de tránsito con el isótopo δ^2H en la cuenca del río Caño Seco. Elaborado por Méndez y Molina, (2015).

Para cuantificar el rendimiento del modelo, se utilizó un criterio estadístico basado en la distancia euclidiana (DE).

$$d_E(P, Q) = \sqrt{(p_1 - q_1)^2 + (p_2 - q_2)^2 + \dots + (p_n - q_n)^2}$$
$$d_E(P, Q) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (p_i - q_i)^2}$$

Ec. 9

Donde P ($p_1, p_2 \dots p_n$) y Q ($q_1, q_2 \dots q_n$) se definen como la distancia entre dos elementos del espacio euclidiano.

Es decir, la distancia euclidiana es la suma de la diferencia entre los valores de los atributos de cada entidad comparada y no más que una extensión simple en un espacio de varias dimensiones del conocido teorema de Pitágoras (Pielou, 1984).

Los elementos definidos para estimar la distancia euclidiana del modelo fueron los datos de los trazadores isotópicos en sus concentraciones de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$, tanto para caudal como para lluvia, la evapotranspiración y la precipitación. La función del DE es minimizar los valores, eso quiere decir que datos más pequeños significan que existe mayor confianza en el resultado del modelo.

La DE también se comportó de forma variable en el tiempo, sus valores máximos rondan el 0,5 y se centran en la temporada lluviosa desde mayo del 2013 hasta noviembre de ese año. Sucede lo contrario para la estación seca, donde se reportan valores mínimos y, por lo tanto, son datos con muy alta confianza, pues su dato más bajo fue de 0,05.

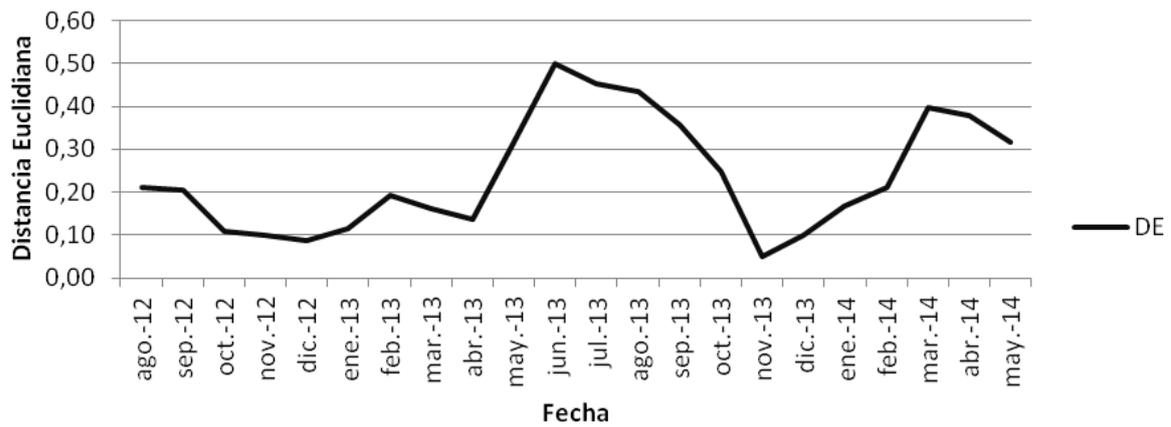


Figura 20 Distancia euclidiana utilizada para evaluar la eficiencia del modelo. Elaborado por Méndez y Molina, (2015).

En general, el rendimiento del modelo fue muy alto, sus datos estuvieron por debajo del 0,5, lo cual tuvo como resultado una simulación que respondió asertivamente en relación con los datos medidos en campo.

3. Capítulo tercero: Conclusiones y recomendaciones para un mejor manejo del recurso hídrico en la cuenca del río Caño Seco

Al tener una pendiente media de 20,79% y un 15,11% en el cauce principal, se catalogó como una cuenca de pendiente media-alta. Esto conlleva que la escorrentía superficial tienda a generarse relativamente fácil y, con ello, se limita la capacidad de infiltración y retención del agua en el suelo y el subsuelo. Lo anterior trae como consecuencia una aceleración en la velocidad de tránsito y, por tanto, una disminución en el tiempo de residencia del agua. Por su parte, la cobertura de la tierra en la cuenca revela que un 46,4% del área total se emplea para cultivos y pastos, cobertura que facilita la generación de escorrentía superficial en la cuenca y, por ende, reduce los tiempos de tránsito del agua en la misma. Las categorías de bosque (25,9%) y bosque en sucesión (19,3%) representan conjuntamente un 45,2% de la cobertura de la tierra, mientras que el uso urbano representa tan solo un 3,8% de la cobertura de la cuenca, lo que deja ver su ruralidad. Por otra parte, las tierras yermas acaparan un 3,3%.

La zona de estudio se caracteriza por tres tipos de suelos, donde destacan mayormente los andisoles y los ultisoles, y en mucha menor medida los entisoles/inceptisoles. En términos generales, se establece que la cuenca presenta suelos fértiles en gran parte de ella, con una alta capacidad de drenaje y retención de agua en los estratos más altos de los perfiles edáficos. Conforme se desciende en los perfiles, es posible encontrar suelos más desarrollados, compactos, arcillosos, con características semiimpermeables a impermeables. Todo esto conlleva a una baja capacidad de infiltración real del suelo y una rápida generación de escorrentía superficial. En cuanto a la geología de la cuenca, está constituida por tres formaciones: Térraba, que comprende un 58,9% del área de la cuenca; Aguacate con un 41%, y Fila de Cal, con tan solo un 0,1% del área de estudio. Por su parte, la geomorfología está conformada por seis unidades, establecidas mediante criterios de topografía, condiciones hidrológicas y origen de las mismas: Agua Buena, que representa un 18,39% del área de la cuenca; Cañas Gordas (33,87%), Concepción (14,29%), Fila Zapote (16,66%) Santa Cecilia (10,57%) y Santo Domingo (6,22%).

La cuenca tiene una densidad de drenaje buena, con un orden de las corrientes medio-alto (nivel 3), lo que implica una mejor captación y traslado de las aguas superficiales y, por ende, menores tiempos de estadía de dichas aguas. Finalmente, la curva hipsométrica da como resultado una cuenca donde predomina tanto el transporte de aguas como la erosión y, en consecuencia, el transporte de materiales, con lo que se puede catalogar el río Caño Seco como un río maduro.

Dado lo anterior, se puede concluir que las variables morfométricas, climáticas y físicas de la cuenca influyen en los tiempos de tránsito del agua, dentro del sitio de estudio. En el caso particular de la cuenca del río Caño Seco, se pudo constatar cómo los tipos de suelo, la pendiente (en un sector), la densidad de drenaje, la forma, el área y la precipitación en la estación lluviosa fomentan la escorrentía superficial y aceleran las velocidades de tránsito, disminuyendo la estadía del agua precipitada en la cuenca.

Mientras tanto, la geología, las zonas con pocas pendientes, las pocas precipitaciones en época seca y la evapotranspiración son factores que reducen las velocidades o la capacidad de escurrir del agua, con lo que aumenta el tiempo de permanencia en la cuenca. Si bien estudios anteriores han demostrado que la topografía de la cuenca es el factor más influyente en cuanto al TT, el índice topográfico de humedad y las variaciones encontradas en los periodos de cuatro meses y relacionados con los periodos de lluvia indican que las velocidades del tránsito del agua en la cuenca son muy variables en el espacio y el tiempo.

De tal forma, las condiciones imperantes de la cuenca, por ejemplo el grado de deforestación, son muy similares a muchas cuencas en medios tropicales y en el país, con usos agrícolas extensivos y relictos boscosos únicamente en las riberas de los ríos y algunos sectores de alta pendiente. El nivel de impermeabilidad de los suelos, las unidades geomorfológicas propias de la cuenca y las condiciones climáticas dominantes hacen que el escurrimiento del agua durante las tormentas tenga el mismo comportamiento que en cuencas de alta pendiente. Por tanto, se concluye que, si bien la cuenca presenta una condición de atipicidad en su morfología, sus características geofísicas y climáticas la hacen comparable con cuencas altas de fuerte pendiente y comportamiento típico, con flujos en forma de torrentes en cortos periodos de tiempo.

Para la línea meteórica de la zona de estudio, se encontró que la variación en la composición isotópica de las precipitaciones con respecto a la elevación no es consistente a lo largo del país, lo que indica un sistema complejo en la distribución y las fuentes de las precipitaciones, tal como lo han mencionado Gómez y Arredondo, (1994), y Sánchez et al., (2013). Además, se obtuvo una diferenciación de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ para la precipitación entre $-18,17\text{‰}$ y $-0,89\text{‰}$ y entre $-135,91\text{‰}$ y $-1,46\text{‰}$, respectivamente, presentándose una variación lineal dada por la ecuación $\delta^2\text{H} = 7,96\delta^{18}\text{O} + 6,57$ ($r^2 = 0,94$). Al generar un análisis de las rectas se observan ligeras desviaciones en la pendiente ($-0,04\text{‰}$) y la constante ($-3,43\text{‰}$), entre la expresión para la LML y la expresión para la línea meteórica mundial (LMM) dada por Craig, (1961) ($\delta^2\text{H} = 8 \delta^{18}\text{O} + 10$), y una diferencia de $-0,21\text{‰}$ en la pendiente y $-6,5\text{‰}$ en la constante conforme con la asignada por Rozanski et al., (1993) ($\delta^2\text{H} = 8,17 (\pm 0,07) \delta^{18}\text{O} + 13,07 (\pm 0,65)$).

Por otra parte, al comparar la LML y las líneas meteóricas para Costa Rica (LMCR) construidas por Sánchez et al., (2013), dada por la ecuación $\delta^2\text{H} = 8,17\delta^{18}\text{O} + 12,27$ ($r^2 = 0,98$; $n = 679$), y la creada por Reynolds-Vargas, (2009), con la expresión $\delta^2\text{H} = 8,33\delta^{18}\text{O} + 14,09$ ($r^2 = 0,993$; $n = 397$, lluvias mensuales $> 20\text{mm}$). En este caso, la pendiente de la LML varía respecto a la de Sánchez et al., (2013) a razón de $-0,21\text{‰}$ y $-5,7\text{‰}$ en su constante, mientras que para la ecuación dada por Reynolds-Vargas, (2009), la desviación se da en torno a $-0,37\text{‰}$ en la pendiente y $-7,52\text{‰}$ en su constante. Además, cabe mencionar la similitud entre las ecuaciones de la LMM dada por Rozanski et al., (1993) y la de Sánchez et al., (2013), donde la pendiente de las rectas es igual y la variación en la constante es de $-0,8\text{‰}$, que se atribuye al efecto localidad.

El tiempo de tránsito no es constante en el tiempo, las variables espaciales previamente mencionadas y las temporales influyen directamente en la respuesta hidrológica de la cuenca. La cuenca bajo sus condiciones naturales es un sistema abierto, unidad dinámica donde los flujos que convergen en ella están lejos de encontrarse en un estado estable, debido a que las condiciones climáticas tienen una

gran variabilidad en la precipitación y evapotranspiración, que también son muy cambiantes según la estación del año, ya sea seca o lluviosa.

A partir de esto, se concluye que el TT en la cuenca del río Caño Seco es muy variable en el tiempo. Los datos muestran dos periodos muy contrastados, los cuales están determinados por la estacionalidad climática. Existen variabilidades, tanto en periodos interanuales como intraanuales, que los determina el tiempo de estaciones, la cantidad de precipitación, la evapotranspiración y las características morfométricas.

Se posee una línea temporal de dos años; sin embargo, no solo se realizó una estimación de la TTD para la secuencia completa, sino también para estimaciones cada 6 meses, para observar y analizar la variabilidad de la distribución del tiempo de tránsito y el comportamiento isotópico dentro de la cuenca. Es importante mencionar que esta metodología en el cálculo de la TTD es novedosa en cuanto a que nunca, en medios tropicales, se ha realizado un estudio fraccionado en una secuencia temporal, ya que siempre se ha realizado la simulación con toda la línea de tiempo completo, para obtener un único resultado para todo ese periodo.

La investigación enfoca su importancia en lo novedosa, ya que presenta la particularidad de que los datos recolectados, tanto de aforos, datos meteorológicos y principalmente los datos de concentraciones isotópicas, nunca han sido recolectados al nivel de detalle que se ha realizado en nuestra región y gran parte del mundo. Del mismo modo, otro aspecto novedoso en el ámbito regional y el mundial es analizar de manera segmentada y cronológicamente la distribución del tiempo de tránsito, para apreciar de mejor manera su comportamiento en época lluviosa y época seca. De igual importancia es el hecho de que, por primera vez en este tipo de análisis, se verificó si existe correlación entre las concentraciones isotópicas, la distribución del tiempo de tránsito y el contexto geográfico en que se encuentra la zona de estudio, lo cual le otorga mayor relevancia a la investigación y le da un carácter pionero en dichos aspectos y que permite establecer posibles recomendaciones o acciones para un mejor manejo del recurso hídrico.

Se espera que los resultados logrados en este proyecto promuevan, entre las entidades responsables del manejo de la cuenca, un mayor interés por llevar a cabo estudios dirigidos a conocer mejor su estado y el del recurso hídrico, además de poner en práctica las medidas necesarias para asegurar la disponibilidad de agua de buena calidad para las futuras generaciones.

De esta manera, se proponen una serie de recomendaciones en pro de un mejor manejo y calidad del recurso hídrico en la cuenca. Una de estas recomendaciones consiste en fomentar la reforestación de las laderas mayores al 50%, o aquellas áreas que entren en las categorías VII y VIII, dentro de la clasificación de la capacidad del uso del suelo, ya establecida por ley, misma situación que se da en los cauces de los ríos y zonas de captación de aguas.

Así mismo, con la ayuda del índice topográfico de humedad, es posible ubicar los lugares donde se da la principal recarga acuífera de la cuenca y, con ello, ser protegidos mediante prácticas agrosilvopastoriles responsables, reforestación o limitaciones para las industrias de alto riesgo cerca de estos puntos, con el fin de disminuir riesgos de contaminación y recuperar o fomentar las condiciones de calidad de las fuentes.

En relación con el contexto de la geografía física de la cuenca, junto con el índice de humedad y el tiempo de tránsito en la cuenca, es preciso adoptar medidas en cuanto a las actividades antropogénicas que en ella se desarrollan. Por ejemplo, se puede reestablecer un sistema de pequeñas lagunas en el sector entre Cañas Gordas y Valle Azul, ya que estos pequeños embalses pueden funcionar como reservorios para utilizarse en las épocas de menor precipitación y estiaje de los ríos, en las labores agrícolas o ganaderas, asumiendo que en este periodo los tiempos aumentan significativamente y los reservorios naturales se recuperan y reabastecen más lentamente.

Tomando como base los resultados en los tiempos de tránsito, es oportuno establecer políticas para orientar un uso eficiente del agua, a través de la formación de una conciencia de uso racional, además de adoptar tecnologías y crear hábitos de

consumo que permitan eliminar el desperdicio y disminuir la contaminación del agua, principalmente en los lapsos de tiempo en que el tiempo de tránsito se incrementa y, por ende, la contaminación tarda más en ser removida del sistema de la cuenca.

Como mejoras a futuro de este tipo de investigaciones, para darle una importancia científica mayor a un ejercicio académico, se propone establecer diferentes estaciones de monitoreo o control. Cada estación representa una condición específica de la cuenca (una zona plana en contraposición con una de alta pendiente, tipos distintos de suelo, uso de la tierra o unidad geomorfológicas), para tener un mejor panorama y un mejor control de lo que sucede dentro de la cuenca y la influencia de sus características en los tiempos de tránsito. A la vez, se recomienda comparar los resultados obtenidos entre diferentes cuencas con características distintas (pendiente, usos de la tierra, geomorfología, entre otros) para tener mayor cantidad de parámetros y mejores resultados.

Se recomienda la aplicación de este tipo de estudios en planes reguladores en el ámbito municipal y el nacional, en planes de gestión del recurso hídrico, y cualquier plan de ordenamiento en general, que en buena medida se debe a que los aportes de las técnicas isotópicas y su relación con la geografía son muy amplios y ayudan a:

- a) Determinar las zonas y velocidad de recarga, y con ello las áreas que deben ser protegidas para la preservación de las fuentes de aguas superficiales y subterráneas.
- b) Estimar tasas y velocidades de escorrentía superficial y subterránea, lo cual ayuda en casos de contaminación de los mantos acuíferos y el tiempo que permanecerán esos contaminantes allí.
- c) Determinar la movilidad de la escorrentía (hacia dónde se mueve el agua).
- d) Establecer la capacidad de almacenamiento superficial, que ayuda a estimar la cantidad de agua con la que se cuenta y así realizar mejores planes de manejo.
- e) Realizar estudios para riego.
- f) Abrir la posibilidad de la recuperación paisajista.
- g) Generar un plan de manejo del agua en la cuenca de estudio.

La geografía, como disciplina, representa un importante aporte para esta investigación, al favorecer el análisis de las variables de la geografía física y de la geografía humana (uso de la tierra, comunidades afectadas, geografía de la población y económica, geografía histórica), con la ayuda del uso de los sistemas de información geográfica. De igual forma, la disciplina se favorece en la incursión de nuevas cuestiones de estudio, que pueden ser ampliadas y abordadas a futuro y, en especial, en ramas como la hidrogeografía, la geopedología y la geomorfología, y su aporte en el ordenamiento territorial y la mejora de la calidad de vida de personas en las comunidades involucradas.

Los principales hallazgos y conclusiones de esta investigación se sintetizan a continuación:

- A partir de los datos generados con el análisis morfométrico, biofísico e hidrometeorológico, junto con la estimación de tiempos de tránsito del agua en la cuenca, es posible desarrollar planes de manejo y prevención de riesgos, pues con ellos se puede identificar, entre otras cosas, zonas de potencial inundación, comportamiento de los cauces, capacidad de respuesta de una cuenca ante eventos naturales, como fuertes precipitaciones, sequías, amenazas antropogénicas como contaminaciones, entre otros.
- Para analizar el efecto de las características de la cuenca en el tiempo de permanencia del agua, se tomó en cuenta que los resultados obtenidos en el modelo matemático representan una integración de la totalidad de dichas variables, aguas arriba del punto de control. Por tanto, no es posible establecer un efecto directo o medible de cada variable respecto al tiempo de tránsito, en un momento o un espacio determinado, sino una relación integrada de todas estas variables que determinan propiamente los tiempos de residencia del agua.
- La pendiente media de la cuenca es de 20,79% y la del cauce principal es de 15,11%, por lo tanto, se obtiene una pendiente que va de media-alta, esto causa, a nivel hidrológico, mayor escorrentía y poca infiltración al suelo y al subsuelo en periodos de tormentas, y a la vez provoca tiempos de tránsito rápidos y disminución en los tiempos de residencia durante eventos extremos.

- Dentro de la cobertura de la tierra, destaca que, en la cuenca, un 46,4% del área es empleado para cultivos y pastos; esto facilita la generación de escorrentía superficial en la cuenca y, por ende, permite reducir los tiempos de tránsito del agua. Por su parte, los bosques y bosques en sucesión representan conjuntamente un 45,2% y están ubicados en zonas de recarga que facilitan la captación del agua dentro de la cuenca.
- Para la línea meteórica de la zona de estudio, se encontró que la variación en la composición isotópica de las precipitaciones con respecto a la elevación no es consistente en todo el país, lo que indica un sistema complejo en la distribución y las fuentes de las precipitaciones.
- El tiempo de tránsito no es constante en el tiempo, las variables espaciales y las temporales influyen directamente en la respuesta hidrológica de la cuenca. Los datos muestran dos periodos muy contrastados, los cuales está determinados por la estacionalidad climática. Existen variabilidades tanto en periodos interanuales como intraanuales, determinados por las estaciones climáticas, la cantidad de precipitación, la evapotranspiración y las características morfométricas.
- Las características geofísicas de la cuenca favorecen la escorrentía superficial de las aguas llovidas, lo que genera un comportamiento típico de una cuenca de fuertes pendientes, con flujos en forma de torrentes en cortos periodos de tiempo y, por ende, permite extrapolar y comparar los resultados obtenidos con cuencas vecinas o con condiciones similares.
- Se recomienda, en futuras investigaciones, la incorporación de más puntos de control, a fin de establecer más fácilmente la influencia de las características de la cuenca en los tiempos de tránsito. Así mismo, obtener información de cuencas con características similares, para realizar comparaciones más exhaustivas.
- La Geografía como disciplina aporta un vasto conocimiento desde sus tres ramas principales (geografía física, humana y SIG), facilitando el análisis e interpretación de los resultados obtenidos, a la vez que se ve favorecida con nuevas temáticas de estudio, que pueden ser abordadas a futuro y ayuda a la generación de políticas para el buen manejo del agua.
- En cuanto a los precios y facilidades de la investigación, es necesario mencionar que la mayor cantidad de gastos de transporte hasta el área de estudio fue facilitada por la Escuela de Geografía de la Universidad de Costa Rica y en

concordancia con las investigaciones que se realizaban en su momento en la zona. Por otra parte, el análisis de las muestras de agua tiene un valor de \$5 cada una. A ello se debe incluir el costo del transporte hasta la Universidad de Aberdeen, en Escocia, donde fueron procesadas. Estos gastos fueron asumidos en parte por el Dr. Christian Birkel y en parte por dicha institución, lo cual permitió, en gran medida, el desarrollo del proyecto de investigación. En general, sumando los costos de transporte, equipo, viáticos, costos de muestreo y el análisis de los resultados, se estima un costo total cercano a los \$8000, lo cual, para una investigación de índole académica y como proyecto final de graduación, resulta un monto elevado, pero para investigaciones científicas más aplicadas se trata de un precio razonable. Por ello, se recomienda la implementación de las técnicas isotópicas, no solo por su aporte científico, sino también por su valor monetario, en proyectos de ordenamiento territorial y planes para la buena gestión del recurso hídrico.

4. Bibliografía

1. Aguilar, I. (2007). *Las cuencas y la gestión del riesgo a los desastres naturales: ¿Qué son las cuencas hidrográficas?* Representante ante la FAO.
2. Almorx, J.; Aguirre, M.; Elisei, V., y Commegna, M. (2012) “Calibración del modelo de Hargreaves para la estimación de la evapotranspiración de referencia en Coronel Dorrego, Argentina”. Rev. FCA UNCUYO. 2012. 44 (1): 101-109.
3. Anaya, O. (2012). “Caracterización morfométrico de la cuenca hidrográfica Chinchao, Distrito de Chinchao, Provincia Huánuco, Región Huánuco”. Práctica pre profesional. Universidad Nacional Agraria de la Selva. Departamento Académico de Ciencias Ambientales. Tingo María, Perú. Tomado de: http://www.unas.edu.pe/web/sites/default/files/web/archivos/actividades_academicas/CARACTERIZACION%20MORFOMETRICA%20DE%20LA%20CUENCA%20HIDROGRAFICA%20CHINCHAO,%20DISTRITO%20DE%20CHINCHAO,%20PROVINCIA%20DE%20HUANUCO,.pdf Fecha de Consulta: 22/11/2015
4. Arce, R.; Moya, M., y Castillo, R. (1990). “Diagnóstico para el control de inundaciones y ordenamiento de la cuenca del río Corredores, Región Brunca, Costa Rica”. Vicerrectoría de Investigación, Departamento de Geografía, San José, Costa Rica.
5. Arqhys Arquitectura: “Aforo”. Tomado de: <http://www.arqhys.com/construccion/aforos.html> Fecha Consulta: 23/10/2013
6. Baskaran, M., y Porcelli, D. (2011). *Handbook of Environmental Isotope Geochemistry, Advances in Isotope Geochemistry*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.
7. Bateman, A. (2007). *Hidrología básica y aplicada*. Grupo de Investigación en Transporte de Sedimentos de la Universidad Politécnica de Cataluña
8. Birkel, C.; Soulsby, C.; Malcolm, I., y Tetzlaff, D. (2013) “Modeling the dynamics of metabolism in montane streams using continuous dissolved oxygen measurements, Water Resour”. Res., 49, doi: 10.1002/wrcr20409.
9. Birkel, C.; Tetzlaff, D.; Dunn, S., y Soulsby, C. (2011). “Using lumped conceptual rainfall–runoff models to simulate daily isotope variability with

- fractionation in a nested mesoscale catchment”. Revista: *Advances in Water Resources* 34 (2011) 383–394.
10. Bolin, B., y Rodhe, H. (1973). “A note on the concepts of age distribution and transit time in natural reservoirs”. *Tellus* XX (1): pp. 58-62
 11. Bullen, T, y Kendall, C. (1998). “Tracing of Weathering Reactions and Water Flowpaths: A Multi-isotope Approach”. En: *Isotope Tracers in Catchment Hydrology*. Kendall, C. y McDonnell, J. J. (editores). Elsevier Science B.V., Amsterdam, pp. 611-646.
 12. Buttle, J. (1994). “Isotope hydrograph separations and rapid delivery of pre-event water from drainage basins”. Tomado de: *Progress in Physical Geography*. 18: pp. 16-41.
 13. Camacho, H., y Guzmán, D. (2005). *Implementación de una red de muestreadores de isótopos estables en la precipitación para obtener la recta meteórica local*. Tesis de grado para optar al título de ingeniero civil. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Bucaramanga, Colombia.
 14. Chow, V.; Maidment, D., y Mays, L. (1994). *Hidrología aplicada*. Bogotá. McGraw-Hill interamericana.
 15. Cortés, V. (2016) *Entrevista*. Escuela de Geografía, Universidad de Costa Rica. Fecha de consulta: 25/04/2016.
 16. Craig, H. (1961). “Isotopic variations in meteoric waters”. Tomado de: *Science*, v. 133, p. 1,702–1,703.
 17. Definición de precipitación. (2013). “¿Qué es? Significado y concepto”. Tomado de: <http://definicion.de/precipitacion/#ixzz2igVjVrpP> Fecha de consulta: 24/10/2013.
 18. Delgadillo y Moreno (2009). “Morfometría de cuencas. Hidrología”. Tomado de:
<http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/adamoren/HIDRO/MORFOMETR%CD%20DE%20CUENCAS.pdf>. Fecha de consulta: 15/09/2015.
 19. Denyer, P., y Kussmaul, S. (2000). *Geología de Costa Rica*. 1.^a ed. Cartago: Editorial Tecnológica de Costa Rica.

20. Dincer, T.; Payne, B. R.; Florkowski, T.; Martinec, J., y Ton Giorgi, E.G.E.I. (1970). "Snowmelt runoff from measurements of tritium and oxygen-18". Tomado de: *Water Resources Research*. 6, 110–124.
21. Duarte, M., y Sánchez, C. (2005). *Uso de trazadores ambientales y estudio de la recarga*. Tesis de grado para optar al título de ingeniero civil. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Colombia. Tomado de: <http://repositorio.uis.edu.co/jspui/bitstream/123456789/1707/2/118682.pdf>
Fecha de consulta: 14/02/2015.
22. Escuela de Geología. Universidad de Sonora, México. (2013). *Balance Hidrológico*. Tomado de: <http://www.geologia.uson.mx/academicos/lvega/ARCHIVOS/ARCHIVOS/BALANCE.htm>. Fecha de consulta: 23/10/2013.
23. ESRI. (2015). *Software: ArcGis for desktop*. Información en: <http://desktop.arcgis.com/es/>.
24. Etcheverry, D., y Perrochet P. (2000). "Direct simulation of groundwater transit-time distributions using the reservoir theory". Tomado de: *Hydrogeology Journal*. Vol. 8, issue 2, 200-208, 2000.
25. Faniran, A. (1968). "The Index of Drainage Intensity - A Provisional New Drainage Factor". Tomado de: *Australian Journal of Science*. Vol. 31: 328-330. En: Maghraby, M.; Masoud, M., y Niyazi, B. "Assessment of surface runoff in arid, data scarce regions; an approach applied in Wadi Al Hamd, Al Madinah Al Munawarah, Saudi Arabia". Tomado de: *Life Sci J*. 2014; 11 (4): pp. 271-289.
26. FAO. (2005). *Sistema de clasificación de la cobertura de la tierra conceptos de clasificación y manual para el usuario*. Versión 2 del programa. Tomado de: http://www.glcn.org/downloads/pub/docs/manuals/lccs/LCCS2-manual_270208_es.pdf. Fecha de consulta: 11/10/2015.
27. FAO. (2007). "Base referencial mundial del recurso suelo". Primera actualización 2007. En: *Informes sobre recursos mundiales de suelos*. No. 103. FAO, Roma.
28. Fattorelli y Fernández. (2011). *Diseño hidrológico*. Edición digital. Tomado de: http://www.ina.gov.ar/pdf/Libro_diseno_hidrologico_edicion_digital.pdf Fecha de consulta: 10/01/2015.

29. Fernández, A. y Palacios, L. (2007). *Cuestiones sobre la energía. Foro de la Industria Nuclear Española*. Tomado de: http://62.43.237.121/222ener_1.pdf
Fecha de consulta: 10/01/2015.
30. Fuentes. (2004). *Análisis morfométrico de cuencas: caso de estudio del parque nacional Pico de Tancítaro*. México. Instituto Nacional de Ecología de México. Tomado de:
http://www.inecc.gob.mx/descargas/cuencas/morfometria_pico_tancitaro.pdf
Fecha de consulta: 24/10/2015.
31. García, W. (s. f.). *El sistema complejo de la cuenca hidrográfica*. Universidad de Medellín. Tomado de:
http://www.unalmed.edu.co/~poboyca/documentos/documentos1/documentos-Juan%20Diego/Plnaifi_Cuencas_Pregrado/Sistema%20CuencaHidrogr%E1fica.pdf. Fecha de consulta: 10/01/2015.
32. Gibson, J.; Birks, S., y Edwards, T. (2008). “Global prediction of δA and δ^2H - $\delta^{18}O$ evaporation slopes for lakes and soil water accounting for seasonality, Global Biogeochem”. En: *Cycles*. 22, GB2031, doi: 10.1029/2007GB002997.
33. Gibson, J.; Bursey, G., y Edwards, T. (1993). “Estimating evaporation using stable isotopes: Quantitative results and sensitivity analysis for two catchments in Norther Canada”. En: *Nordic Hidrology*. Vol. 24, 1993, pp. 79-94.
34. Glosarios servidor Alicante. (2013). *Glosarios de términos especializados de las ciencias, las artes, las técnicas y la sociedad*. Tomado de:
<http://glosarios.servidor-alicante.com/astrologia/isotopo>. Fecha de consulta: 01/05/2015.
35. Gómez, S., y Arredondo. (1994). *Hidrología isotópica del valle del río Tempisque, Guanacaste, Costa Rica*. Servicio Nacional de Aguas Subterráneas, Riego y Avenamiento (Senara). San José, Costa Rica.
36. Godsey, Sarah E.; Aas, Wenche; Clair, Thomas A.; de Wit, Heleen A.; Fernandez, Ivan J.; Kahl, J. Steve; Malcolm, Iain A.; Neal, Colin; Neal, Margaret; Nelson, Sarah J.; Norton, Stephen A.; Palucis, Marisa C.; Skjelkvale, Brit Lisa; Soulsby, Chris; Tetzlaff, Doerthe; Kirchner, James W., (2010). Generality of fractal 1/f scaling in catchment tracer time series, and its

- implications for catchment travel time distributions. *Hydrol. Process.* 24 (12), 1660–1671
37. Gravelius, H. (1914): “Flusskunde. Goschen Verlagshan dlug Berlin”. En: Bendjoudi, H., y Hubert, P. (2002). “Le coefficient de compacité de Gravelius: analyse critique d'un indice de forme des bassins versants”. Tomado de: *Hydrological Sciences Journal*. Vol. 47: 6, pp. 921-930.
 38. Gutiérrez, M. (2008). *Geomorfología*. Pearson educación S. A. Madrid. P. 2.
 39. Guzmán, I. (2007). “Recursos hídricos en América Latina: planificación... es la estrategia”. En: *Tecnología en marcha*. Vol. 21-1, enero-marzo 2008, pp. 161-173.
 40. Hack, J. (1973). “Stream-profile analysis and stream gradient index: United States Geological Survey”. En: *Journal of Research*. Vol. 1, pp. 421-429.
 41. Hargreaves, G., y Samani, Z. (1985). “Reference crop evapotranspiration from temperature”. En: *Applied Eng. in Agric.*, 1 (2): pp. 96-99.
 42. Hrachowitz, M.; Soulsby, C.; Tetzlaff, D.; Malcolm, I., y Schoups, G. (2010). “Gamma distribution models for transit time estimation in catchments: Physical interpretation of parameters and implications for time - variant transit time assessment”. En: *Water Resour. Res.* 46, W10536, doi: 10.1029/2010WR009148.
 43. Horton, R. E. (1945). “Erosional Development of Streams and Their Drainage Basins”. En: *Geolo. Soc. of Am. Bull.* Vol. 56 (3), pp. 275 - 370.
 44. International atomic energy agency. (1981). “Stable Isotope Hydrology: deuterium and oxygen-18 in the water cycle”. En: *Technical reports series*. N.º 210. Viena.
 45. Kendall, C., y Caldwell E. (1998). “Fundamentals of Isotope Geochemistry. Isotope Tracers in Catchment Hydrology”. En: Kendall, C., y McDonnell, J. (editores). *Elsevier Science B.V.*, Amsterdam. pp. 51-86.
 46. Kendall, C., y McDonnell, J. (editores). (1998). *Isotope Tracers in Catchment Hydrology Elsevier Science B.V.* Amsterdam.
 47. Kirchner, J.W.; Feng, X., y Neal, C. (2000). “Fractal stream chemistry and its implications for contaminant transport in catchments”. En: *Nature*. Vol. 403 (6769), pp. 524–527.

48. Kirchner, J.W.; Feng, X., y Neal, C. (2001). "Catchment-scale advection and dispersion as a mechanism for fractal scaling in stream tracer concentrations". En: *Journal of Hydrology*. Vol. 254, pp. 82–101.
49. Llamas, José. (1993) *Hidrología general: Principios y aplicaciones*. Servicio Editorial de la Universidad del País Vasco.
50. Leibundgut, Maloszewski y Kuells. (2009) *Tracers in Hydrology*. Wiley.
51. Lindgren, G.; Destouni, G., y Miller, A. (2004). "Solute transport through the integrated groundwater-stream system of a catchment". En: *Water Resources Research*. N.º 40, W03511.
52. Lindsay, J. B. (2009). *Software: Whitebox Gat. University of Guelph*. Tomado de: <http://www.uoguelph.ca/~hydrogeo/software.shtml> Fecha de consulta: 30/11/2015.
53. Maloszewski, P.; Herrmann, F.; Schöniger, M., y Stichler, W. (1990). "The environmental tracer approach as a tool for hydrological evaluation and regionalization of catchment systems. Regionalization in Hydrology". En: *IAHS*. Publ. n.º 191.
54. Maloszewski, P, y Zuber, A. (1982). "Determining the turnover time of groundwater systems with the aid of environmental tracers: 1. Models and their applicability". En: *Journal of Hydrology*. N.º 57: pp. 207–231,
55. Mazar, E. (2005). *Chemical and Isotopic groundwater hydrology*. Tercera Edición. Taylor and Francis e-Library.
56. McDonnell, J., y Kendall, C. (1992). "Isotope tracers in hydrology--report to the Hydrology Section". En: *EOS Trans. Amer. Geophys. Union*. N.º 73: pp. 260-261.
57. McDonnell, J. et al. (2010). "How old is the streamwater? Open questions in catchment transit time conceptualization, modelling and analysis". En: *Hydrol. Process*. N.º 24, pp. 1745–1754.
58. McGuire, K. et al. (2005). "The role of topography on catchment-scale water residence time". En: *Water Resour. Res.* N.º 41, W05002, doi: 10.1029/2004WR003657.
59. McGuire, K., y McDonnell J. (2006). "A review and evaluation of catchment transit time modeling". En: *Journal of Hydrology*. N.º 330, pp. 543-563.

60. Mook, W. (2001). *Environmental isotopes in the hydrological cycle: Principles and applications*. International Hydrological Programme. Centre for Isotope Research. Groningen, Netherlands.
61. Morales, E., y Liberoff, J. (2013). *Diagnóstico sociocultural y físico espacial de las comunidades ubicadas en el corredor fronterizo. Cantón Coto Brus, Puntarenas*. Ministerio de Vivienda y Asentamientos Humanos. San José, Costa Rica. Tomado de: http://exnet.mivah.go.cr/Documentos%5Cinvestigaciones_diagnosticos%5Cdiagnosticos_planes_intervencion%5C2013%5CCOTO_BRUS%5CDIAGNOSTICO_COTO_BRUS_FRONTERA.pdf. Fecha de consulta: 01/05/2015.
62. Moser, H., y Rauert, W. (editores). (1980). *Isotopenmethoden in der Hydrologie*. Gebr. Borntraeger, Berlin-Stuttgart.
63. Mullen, K.; Ardia, D.; Gil, D.; Windover, D, y Cline, J. (2011). “DEoptim: An R package for global optimization by differential evolution”. En: *J. Stat. Software*. Vol. 40 (6), pp. 1-26.
64. Organización Internacional de Energía Atómica (OIEA). (1995). *Isotopes in water and environmental management. Division of public information*. Tomado de: <http://www-naweb.iaea.org/naweb/ih/documents/other/Isotopes%20In%20Water%20and%20Environmental%20Management%201995%20.pdf>. Fecha de consulta: 10/01/2015.
65. Paris, M. et al. (2009). *Las miradas del agua*.– 1.^a ed. Santa Fe: Universidad Nacional del Litoral. Tomado de: <http://www.lawetnet.org/lasmiradasdelagua/descargas/Las%20Miradas%20del%20Agua.pdf>. Fecha de consulta: 10/01/2015.
66. Payne, B. (2001). “Las técnicas isotópicas en hidrología: instrumentos prácticos para resolver los problemas del agua”. En: . Volumen 24, n.º 3.
67. Pearce, A.; Stewart, M., y Sklash, M. (1986). “Storm runoff generation in humid headwater catchments. 1. Where does the water come from?” En: *Water Resources Research*. N.º 22, pp. 1263-1272.
68. Price, K.; Storn, R., y Lampinen, J. (editores). (2006). *Differential Evolution: A Practical Approach to Global Optimization*. Nat. Comput. Ser., Springer, Berlin, Germany.

69. Redondo, R. (2008). *Fundamentos teóricos y técnicos de los isótopos estables Servicio Interdepartamental de Investigación (SIDI)*. Facultad de Ciencias, C-IX Universidad Autónoma de Madrid. Madrid.
70. Reynolds, J., y Fraile, J. (2009). “Utilización de Isótopos Estables en la Precipitación para Determinar Zonas de Recarga del Acuífero Barva, Costa Rica”. Universidad Nacional, Heredia Costa Rica. En: *Estudios de Hidrología Isotópica en América Latina 2006*. Organismo Internacional de Energía Atómica. Viena.
71. Roa-Lobo, J., y Kamp, U. (2012). “Uso del índice topográfico de humedad (ITH) para el diagnóstico de la amenaza por desborde fluvial, estado Trujillo-Venezuela”. En: *Revista Geográfica Venezolana*. Vol. 53 (1), pp. 109-126.
72. Rozanski, K.; Araguas-Araguas, L., y Gonfiantini, R. (1993). “Isotopic patterns in modern global precipitation”. En: *Continental Isotope Indicator of Climate, American Geophysical Union. Geophysical Monograph*. N.º 78, pp. 1-36
73. Rueda, F.; Moreno-Ostos, E., y Armengol, J. (2006). “The residence time of river water in reservoirs”. En: *Ecological Modelling*. Vol. 191 (2), pp. 260-274.
74. Sánchez, R., et al. (2013). “Spatial and temporal variation of stable isotopes in precipitation across Costa Rica: An analysis of historic GNIP records”. En: *Mod. Hydrol.* N.º 3, pp. 226-240, doi:10.4236/ojmh.2013.34027.
75. Sánchez, R. et al. (2015). *Key drivers controlling daily stable isotope variations in precipitation of Costa Rica: Caribbean Sea versus Pacific Ocean moisture sources*. DOI
76. Shanley, J. et al. (1998). “Isotopes as Indicators of Environmental Change. Isotope Tracers in Catchment Hydrology”. En: Kendall, C., y McDonnell, J. (editores). *Elsevier Science B.V.* Amsterdam, pp. 761-816.
77. Shanley, J. et al. (1998). “The effect of catchment size and land cover on the contributions of meltwater to stream discharge during snowmelt in a Vermont watershed”. Submitted.
78. Schumm, S. (1956). “The Evolution of drainage systems and slopes in badlands at Perth Amboi, New Jersey”. En: *Geological Society of America Bulletins*. Vol. 67 (5).

79. Sklash, M. (1990). "Environmental isotope studies of storm and snowmelt runoff generation". En: Anderson, M., y Burt, T. (editores). *Process Studies in Hillslope Hydrology*. John Wiley and Sons, Chichester, U.K., pp. 401-435.
80. Strahler, A. (1964). *Quantitative geomorphology of drainage basins and channel networks. Handbook of Applied Hydrology*. New York, McGraw Hill Book Company.
81. Tarbuck y Lutgens. (2014). *Geología*. Pearson educación S. A., Madrid.
82. Villón, M. (2002). *Hidrología*. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Cartago, Costa Rica.
83. Villón, M. (2004). *Hidrología*. 1.^a ed.. Cartago: Editorial Tecnológica de Costa Rica.
84. Willem, G., et al. (2001). "Environmental isotopes in the hydrological cycle: Principles and applications. Volume II Atmospheric water". En: International Hydrological Programme. No. 39, Vol. II. Unesco, París.

5. Anexos

Anexo 1. Cuadro resumen de las variables morfométricas de la cuenca del río Caño Seco.

Características cuenca río Caño Seco	
Área (Km ²)	31,21
Perímetro (Km ²)	30,27
Elevación máxima	1475,62
Elevación mínima	1036,63
Elevación media	1163,51
Largo (km)	5,24
Ancho (km)	5,96
Índice o factor de forma	1,14
Índice de compacidad	1,52
Densidad de drenaje (km/km ²)	2,72
Pendiente media de la cuenca (%)	20,79 (18,711°)
Pendiente media del cauce principal (%)	15,11 (13,6°)
Orden de la red de drenaje	Orden 3
Longitud cauce principal	11,53 km

Anexo 2. Estaciones o puntos de control utilizados por Sánchez et al., para el cálculo de la línea meteórica de Costa Rica e interpolados en la presente investigación para obtener la distribución espacial de las concentraciones de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ en todo el país, agregando los valores encontrados para la cuenca del río Caño Seco.

Estación	Latitud	Longitud	Altitud (m)	Clima	Periodo de estudio	Muestras	LMWL	r2	Precipitación (mm)
Monte Galán	10,59	-85,62	60	Aw	01/90-12/90	8	$\delta^2\text{H}=6,06\delta^{18}\text{O}-2,69$	0,91	1185
Estrada	10,0667	-83,2833	6	Af	10/90-03/92	21	$\delta^2\text{H}=7,59\delta^{18}\text{O}+7,40$	0,94	1055
Capulín	10,6228	-85,4611	125	Aw	11/97-05/98	8	$\delta^2\text{H}=7,79\delta^{18}\text{O}+6,82$	0,99	N.A.
Hacienda Tempisque	10,5	-85,53	22	Aw	05/90-07/90	13	$\delta^2\text{H}=7,81\delta^{18}\text{O}+5,52$	0,92	897
Cartagena	10,38	-85,675	63	Aw	01/91-12/91	7	$\delta^2\text{H}=7,83\delta^{18}\text{O}+1,95$	0,97	1010
Irazú	9,9833	-83,85	3000	Cbf	01/90-12/90	8	$\delta^2\text{H}=7,85\delta^{18}\text{O}+8,91$	0,98	N.A.
AB	9,9958	-84,2319	860	Aw	12/03-10/04	12	$\delta^2\text{H}=7,91\delta^{18}\text{O}+10,11$	0,99	2017
Turrucare	9,9617	-84,3237	642	Aw	12/03-10/04	11	$\delta^2\text{H}=7,93\delta^{18}\text{O}+9,66$	0,99	1945
Orotina	9,887	-84,5387	168	Aw	03/02-01/04	19	$\delta^2\text{H}=7,93\delta^{18}\text{O}+9,70$	0,99	2256
Itiquis	10,0511	-84,2061	1110	Aw	10/03-9/04	11	$\delta^2\text{H}=7,93\delta^{18}\text{O}+10,71$	0,99	3026
Caño Seco	8,742	-82,943	1037	Am	2012-2014	391	$\delta^2\text{H}=8,05\delta^{18}\text{O}+7,26$	0,95	3300
La Garita	10,0052	-84,2957	760	Aw	10/03-9/04	12	$\delta^2\text{H}=7,97\delta^{18}\text{O}+10,99$	0,99	2349
Taus	9,7833	-83,7167	900	Cbf	01/90-12/90	8	$\delta^2\text{H}=7,97\delta^{18}\text{O}+11,10$	0,97	4256
Naranjo	10,1001	-84,3917	1051	Aw	01/02-12/03	15	$\delta^2\text{H}=7,98\delta^{18}\text{O}+9,80$	0,99	2064

Est.Ecológica	10,6944	-85,3706	340	Aw	11/97-05/98	7	$\delta 2H=8,03\delta 180+8,77$	0,95	N.A.
Puriscal	9,8656	-84,3267	836	Aw	01/02-01/04	22	$\delta 2H=8,03\delta 180+12,21$	0,99	2694
Santa María	10,7667	-85,32	825	Am	01/90- 12/9201/97- 12/98	26	$\delta 2H=8,04\delta 180+9,67$	0,99	1901
Golfito	8,64	-83,1667	15	Af	01/90-12/90	7	$\delta 2H=8,08\delta 180+11,60$	0,99	2633
Puntarenas	9,9667	-84,8333	3	Aw	01/93- 12/9301/03- 12/04	15	$\delta 2H=8,10\delta 180+12,00$	0,99	1443,35
Poás	10,1818	-84,2193	2500	Cbf	12/97-06/99	14	$\delta 2H=8,12\delta 180+14,52$	0,99	N.A.
Aranjuez	9,938	-84,0696	1191	Aw	02/02-01/04	19	$\delta 2H=8,16\delta 180+12,11$	0,99	1910
Heinz Hoffman	10,0807	-84,1299	1650	Aw	12/03-10/04	12	$\delta 2H=8,16\delta 180+12,45$	0,99	2940
Herradura	9,6667	-84,6333	3	Am	01/90-12/90	8	$\delta 2H=8,18\delta 180+12,32$	0,99	3082
Santa Lucía	10,023	-84,1118	1251	Aw	01/02-12/03	18	$\delta 2H=8,19\delta 180+12,01$	0,99	1793
Santa Bárbara	10,0334	-84,166	1102	Aw	02/02-01/04	21	$\delta 2H=8,19\delta 180+12,01$	0,99	2522
Rancho Redondo	9,9686	-83,9713	1662	Aw	02/02-01/04	21	$\delta 2H=8,20\delta 180+13,20$	0,98	2435
Monte de la Cruz	10,0577	-84,0879	1700	Aw	10/03-09/04	13	$\delta 2H=8,24\delta 180+12,80$	0,99	2189
Santa Rosa	10,31	-85,8	25	Aw	01/90-12/90	4	$\delta 2H=8,24\delta 180+13,30$	0,99	992
San Pablo	10,0008	-84,0882	1215	Aw	12/03-10/04	12	$\delta 2H=8,30\delta 180+13,19$	0,99	2051
Pacayas	9,8	-84,05	1735	Cwb	01/90-12/90	8	$\delta 2H=8,37\delta 180+13,72$	0,99	1942
Sacramento	10,1081	-84,1221	2260	Cbf	01/90- 12/9001/03- 12/04	21	$\delta 2H=8,39\delta 180+13,62$	0,99	2577,5
Birrí	10,055	-84,137	1318	Aw	12/03-10/04	12	$\delta 2H=8,40\delta 180+14,20$	0,99	2916
Vara Blanca	10,1732	-84,131	1845	Aw	12/03-10/04	12	$\delta 2H=8,40\delta 180+14,84$	0,99	4579
Paso Llano	10,1128	-84,0991	2397	Cfa	12/03-10/04	12	$\delta 2H=8,40\delta 180+16,27$	0,99	4131
Cóbano	9,69	-85,11	160	Aw	01/90-12/90	8	$\delta 2H=8,42\delta 180+13,57$	0,98	2400
Nosara	9,9667	-85,6667	15	Aw	05/90-06/91	14	$\delta 2H=8,43\delta 180+10,89$	0,92	1591
Recope	9,8949	-83,9388	1563	Aw	02/02-01/04	19	$\delta 2H=8,44\delta 180+15,45$	0,99	1179
Fraijanes	10,1359	-84,1917	1737	Aw	01/02-01/12	24	$\delta 2H=8,47\delta 180+16,58$	0,99	3506
La Selva	10,4314	-84,0029	45	Aw	01/02-01/04	23	$\delta 2H=8,48\delta 180+14,03$	0,99	4304
La Giralda	10,1282	-84,16	2014	Cfa	01/02-12/03	20	$\delta 2H=8,49\delta 180+16,71$	0,99	2708
Palmar Sur	8,95	-83,46	16	Am	01/90-12/90	8	$\delta 2H=8,50\delta 180+14,17$	0,99	3293
Pto, Limón	9,962	-83,0251	0	Af	6/03-05/04	12	$\delta 2H=8,51\delta 180+10,74$	0,99	4162
Zurquí	10,0573	-84,0124	1548	Aw	03/02-05/04	28	$\delta 2H=8,57\delta 180+17,53$	0,99	5074
Río Segundo	10,0089	-84,1908	980	Aw	12/03-10/04	11	$\delta 2H=8,59\delta 180+16,11$	0,99	2092
Monteverde	10,3067	-84,8047	1460	Am	06/03-03/05	42	$\delta 2H=8,60\delta 180+14,28$	0,99	N.A.
Puerto Humo	10,31	-85,345	10	Aw	01/90-12/90	9	$\delta 2H=8,60\delta 180+14,50$	0,99	1374
Turrialba	9,8913	-83,6529	604	Aw	01/04-02/02	24	$\delta 2H=8,62\delta 180+16,53$	0,99	3177

Anexo 3: Precipitación, evapotranspiración potencial, lluvia y concentraciones de $\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$ en la precipitación para toda la serie temporal.

Fecha	Evapotranspiración (mm/d)	Lluvia (mm/d)	2H	18O
01/05/2012	1,91	0,60	-51,48	-6,96
02/05/2012	1,91	0,31	-54,58	-7,29
03/05/2012	1,92	0,30	-47,14	-6,43
04/05/2012	1,90	0,30	-57,09	-7,59
05/05/2012	1,91	0,30	-48,70	-6,66
06/05/2012	1,89	14,60	-57,30	-8,06
07/05/2012	1,87	26,96	-64,69	-9,30
08/05/2012	1,91	39,60	-44,60	-7,44
09/05/2012	1,89	20,10	-57,78	-8,30
10/05/2012	1,91	2,70	-50,62	-6,92
11/05/2012	1,90	23,10	-58,95	-8,47
12/05/2012	1,93	0,90	-43,98	-6,11
13/05/2012	1,89	36,60	-61,22	-9,17
14/05/2012	1,88	92,50	-63,04	-11,11
15/05/2012	1,87	9,40	-67,11	-9,01
17/05/2012	1,95	13,00	-40,03	-5,97
18/05/2012	1,91	7,50	-55,79	-7,63
19/05/2012	1,87	11,00	-65,54	-8,89
20/05/2012	1,91	59,30	-52,24	-8,87
21/05/2012	1,87	23,70	-69,37	-9,72
22/05/2012	1,89	5,90	-59,79	-8,06
23/05/2012	1,94	13,50	-44,51	-6,50
24/05/2012	1,95	23,50	-43,47	-6,66
25/05/2012	1,93	6,60	-47,42	-6,62
26/05/2012	1,92	0,30	-45,61	-6,29
27/05/2012	1,95	0,30	-35,11	-5,07
28/05/2012	1,93	0,60	-42,26	-5,91
29/05/2012	1,98	1,80	-23,30	-3,77
30/05/2012	1,92	81,40	-44,01	-8,65
31/05/2012	1,89	0,20	-54,17	-7,31
02/06/2012	1,89	0,20	-40,91	-5,81
03/06/2012	1,86	41,00	-58,00	-8,96
04/06/2012	1,86	2,60	-59,13	-7,91
05/06/2012	1,86	3,00	-57,23	-7,71
07/06/2012	1,91	1,00	-37,38	-5,36
08/06/2012	1,88	9,00	-47,68	-6,80
09/06/2012	1,85	1,60	-57,90	-7,82
10/06/2012	1,88	7,80	-49,42	-6,95
11/06/2012	1,82	13,60	-68,83	-9,44

12/06/2012	1,83	0,40	-65,73	-8,64
13/06/2012	1,80	36,60	-81,89	-11,57
14/06/2012	1,86	0,40	-52,32	-7,16
15/06/2012	1,89	0,60	-46,16	-6,38
16/06/2012	1,80	14,80	-79,93	-10,70
17/06/2012	1,82	1,00	-66,43	-8,82
18/06/2012	1,88	0,20	-48,18	-6,63
20/06/2012	1,86	6,40	-56,15	-7,71
21/06/2012	1,84	24,00	-60,30	-8,78
22/06/2012	1,83	9,40	-66,62	-9,02
23/06/2012	1,86	2,20	-53,24	-7,27
24/06/2012	1,84	5,60	-62,94	-8,47
25/06/2012	1,85	0,80	-55,57	-7,55
26/06/2012	1,80	12,60	-75,54	-10,17
27/06/2012	1,84	0,20	-61,56	-8,18
28/06/2012	1,85	2,80	-57,57	-7,82
29/06/2012	1,82	6,60	-63,58	-8,67
30/06/2012	1,80	33,40	-71,66	-10,42
02/07/2012	1,86	0,20	-56,50	-7,56
03/07/2012	1,87	41,00	-44,96	-7,60
04/07/2012	1,84	5,80	-63,90	-8,62
05/07/2012	1,82	8,20	-67,14	-9,10
07/07/2012	1,87	1,62	-49,93	-6,91
08/07/2012	1,85	13,20	-64,72	-8,90
09/07/2012	1,88	1,40	-45,78	-6,42
11/07/2012	1,88	0,40	-47,44	-6,59
12/07/2012	1,85	1,40	-55,33	-7,53
13/07/2012	1,87	10,00	-50,30	-7,18
14/07/2012	1,86	0,20	-50,53	-7,00
16/07/2012	1,90	0,20	-42,09	-5,93
17/07/2012	1,86	13,80	-52,84	-7,65
19/07/2012	1,89	1,00	-48,87	-6,69
20/07/2012	1,86	4,00	-58,12	-7,85
21/07/2012	1,85	0,20	-59,43	-7,95
22/07/2012	1,85	5,20	-61,74	-8,31
23/07/2012	1,83	0,20	-62,65	-8,38
24/07/2012	1,82	0,60	-62,25	-8,40
25/07/2012	1,88	0,40	-48,94	-6,72
26/07/2012	1,90	0,40	-44,54	-6,18
27/07/2012	1,90	9,20	-41,02	-6,07
28/07/2012	1,83	5,60	-68,78	-9,16
29/07/2012	1,83	10,20	-64,83	-8,92
02/08/2012	1,46	0,20	-60,14	-8,00
03/08/2012	1,50	41,00	-47,46	-7,80

04/08/2012	1,46	3,40	-57,17	-7,76
05/08/2012	1,46	2,80	-56,59	-7,68
07/08/2012	1,45	16,20	-71,48	-9,76
08/08/2012	1,44	8,60	-60,09	-8,26
09/08/2012	1,47	15,80	-64,34	-8,98
11/08/2012	1,46	15,30	-74,23	-9,98
12/08/2012	1,47	0,31	-52,27	-7,03
13/08/2012	1,44	0,31	-58,54	-7,75
14/08/2012	1,42	0,60	-69,94	-9,07
16/08/2012	1,46	0,30	-63,27	-8,25
17/08/2012	1,43	27,55	-91,37	-13,01
19/08/2012	1,45	20,70	-66,45	-10,10
20/08/2012	1,43	20,00	-69,09	-9,62
21/08/2012	1,44	2,70	-56,13	-7,59
22/08/2012	1,44	28,40	-41,72	-3,42
23/08/2012	1,43	14,70	-59,70	-9,02
24/08/2012	1,43	3,90	-62,35	-8,32
25/08/2012	1,44	25,10	-48,32	-7,66
26/08/2012	1,46	0,30	-62,29	-8,20
30/08/2012	1,43	18,80	-54,84	-8,13
31/08/2012	1,48	4,80	-52,67	-7,22
01/09/2012	1,52	0,30	-50,67	-6,86
02/09/2012	1,50	0,33	-64,75	-8,48
03/09/2012	1,51	0,30	-60,36	-7,96
04/09/2012	1,49	41,00	-50,08	-7,91
05/09/2012	1,52	76,00	-58,18	-9,00
08/09/2012	1,52	13,80	-55,49	-8,74
10/09/2012	1,56	7,10	-31,78	-4,52
12/09/2012	1,52	14,10	-59,69	-8,79
13/09/2012	1,51	1,20	-44,11	-6,99
14/09/2012	1,52	0,60	-50,71	-6,89
30/09/2012	1,52	9,60	-49,75	-6,67
01/10/2012	3,50	7,50	-57,11	-8,99
02/10/2012	3,53	0,20	-55,65	-7,46
03/10/2012	3,49	41,00	-61,09	-9,36
04/10/2012	3,48	12,40	-76,60	-11,07
07/10/2012	3,35	1,00	-86,02	-10,96
09/10/2012	3,39	16,50	-71,86	-9,82
10/10/2012	3,40	8,40	-71,27	-9,47
11/10/2012	3,42	3,20	-62,89	-8,45
17/10/2012	3,35	21,30	-61,52	-9,24
18/10/2012	3,33	15,80	-67,09	-10,29
24/10/2012	3,27	36,50	-81,23	-11,68
25/10/2012	3,25	7,80	-69,79	-10,05

29/10/2012	3,37	6,50	-59,82	-9,48
02/11/2012	0,78	0,20	-59,82	-9,48
03/11/2012	0,80	41,00	-33,37	-5,83
04/11/2012	0,82	2,40	-54,62	-7,39
05/11/2012	0,80	2,60	-69,60	-9,13
07/11/2012	0,81	1,00	-68,85	-8,98
23/11/2012	0,79	3,20	-45,62	-6,61
24/11/2012	0,80	11,80	-47,93	-6,81
25/11/2012	0,79	28,60	-20,20	-4,32
26/11/2012	0,80	2,60	-68,07	-8,95
27/11/2012	0,81	0,20	-58,57	-7,77
28/11/2012	0,81	0,40	-62,17	-8,19
29/11/2012	0,79	2,00	-75,08	-9,78
30/11/2012	0,78	0,40	-87,86	-11,15
02/12/2012	1,85	0,20	-75,35	-9,73
03/12/2012	1,84	51,00	-78,16	-11,58
04/12/2012	1,83	6,60	-73,81	-9,76
05/12/2012	1,83	3,00	-80,28	-10,37
07/12/2012	1,83	13,22	-80,34	-10,68
08/12/2012	1,86	1,60	-69,99	-9,17
09/12/2012	1,89	0,40	-44,25	-6,31
10/12/2012	1,91	0,20	-51,75	-7,01
11/12/2012	1,90	0,20	-57,20	-7,68
10/01/2013	2,19	0,20	-63,45	-8,47
12/01/2013	2,15	0,20	-45,14	-6,37
14/01/2013	2,12	0,20	-54,80	-7,51
15/01/2013	2,15	0,20	-41,02	-5,93
17/01/2013	2,08	0,20	-71,51	-9,38
02/02/2013	1,94	0,20	-22,26	-4,04
03/02/2013	1,90	19,50	-37,60	-6,42
04/02/2013	1,92	2,40	-39,29	-5,87
05/02/2013	1,93	2,60	-18,64	-4,41
07/02/2013	1,93	1,00	-48,53	-6,83
15/02/2013	1,93	13,50	-33,37	-5,83
02/03/2013	3,43	0,20	-59,15	-7,99
03/03/2013	3,59	0,30	-20,88	-3,77
05/03/2013	3,56	41,00	-11,78	-3,15
07/03/2013	3,72	1,00	-11,78	-3,15
11/03/2013	3,62	1,00	-32,54	-4,91
12/03/2013	3,62	0,30	-38,47	-5,57
14/03/2013	3,57	0,20	-32,83	-5,08
15/03/2013	3,60	0,20	-5,61	-0,89
17/03/2013	3,62	0,40	-26,95	-4,35
18/03/2013	3,62	0,20	-37,50	-5,42

27/03/2013	3,67	0,60	-4,16	-1,97
02/04/2013	3,57	0,20	-54,65	-7,35
03/04/2013	3,64	24,50	-21,78	-4,02
04/04/2013	3,58	0,30	-46,22	-6,38
05/04/2013	3,66	13,50	-24,41	-4,66
07/04/2013	3,67	1,00	-27,34	-4,36
11/04/2013	3,71	12,50	-24,41	-4,66
17/04/2013	3,70	3,20	-24,41	-4,66
20/04/2013	3,51	2,50	-24,41	-4,66
21/04/2013	3,48	8,50	-24,41	-4,66
24/04/2013	3,65	4,60	-24,41	-4,66
25/04/2013	3,70	7,80	-24,41	-4,66
26/04/2013	3,63	6,50	-24,41	-4,66
27/04/2013	3,54	2,30	-24,41	-4,66
01/05/2013	3,17	26,96	-13,27	-3,40
02/05/2013	3,16	0,20	-17,28	-3,25
03/05/2013	3,14	3,50	-9,85	-2,78
04/05/2013	3,25	2,40	-20,34	-3,66
05/05/2013	3,15	39,60	-12,93	-3,44
07/05/2013	3,14	1,00	-16,68	-3,22
09/05/2013	3,12	23,10	-16,62	-4,21
20/05/2013	3,11	36,60	-77,75	-10,83
21/05/2013	3,10	6,50	-66,79	-8,95
22/05/2013	3,04	92,50	-135,91	-18,17
24/05/2013	3,08	16,50	-116,08	-15,61
25/05/2013	3,14	8,90	-61,23	-8,97
27/05/2013	3,15	5,50	-66,44	-9,94
28/05/2013	3,12	7,20	-66,15	-9,69
29/05/2013	3,05	4,60	-72,11	-9,54
30/05/2013	3,06	15,50	-110,10	-15,23
31/05/2013	3,09	0,60	-85,22	-10,84
02/06/2013	3,53	0,20	-85,22	-10,84
03/06/2013	3,52	59,30	-83,00	-11,99
04/06/2013	3,45	2,40	-51,57	-7,06
07/06/2013	3,48	1,00	-50,84	-6,89
08/06/2013	3,42	44,60	-79,27	-11,77
09/06/2013	3,47	2,40	-55,62	-7,51
10/06/2013	3,43	5,20	-64,51	-9,38
11/06/2013	3,47	4,00	-57,46	-7,76
13/06/2013	3,47	41,20	-81,21	-11,70
14/06/2013	3,41	0,40	-60,63	-8,04
16/06/2013	3,51	0,40	-55,06	-7,37
17/06/2013	3,55	1,20	-44,04	-6,09
18/06/2013	3,47	24,80	-66,48	-9,82

19/06/2013	3,37	0,80	-64,13	-8,47
20/06/2013	3,44	4,60	-67,23	-8,92
21/06/2013	3,44	0,20	-61,32	-8,05
22/06/2013	3,48	0,80	-46,38	-6,50
23/06/2013	3,41	13,20	-44,78	-6,81
24/06/2013	3,42	20,20	-63,97	-9,39
25/06/2013	3,46	5,60	-63,97	-9,39
26/06/2013	3,51	0,60	-63,97	-9,39
27/06/2013	3,44	7,00	-63,99	-9,60
28/06/2013	3,28	6,60	-63,99	-9,60
29/06/2013	3,33	1,00	-63,99	-9,60
30/06/2013	3,40	18,60	-66,14	-9,65
01/07/2013	2,26	1,81	-66,14	-9,65
02/07/2013	2,30	0,20	-66,14	-9,65
03/07/2013	2,32	41,00	-64,34	-9,39
04/07/2013	2,30	2,60	-64,34	-9,39
05/07/2013	2,32	2,60	-64,34	-9,39
07/07/2013	2,34	2,20	-64,34	-9,39
08/07/2013	2,28	1,20	-64,34	-9,39
09/07/2013	2,33	1,20	-64,34	-9,39
10/07/2013	2,27	50,20	-66,65	-9,55
11/07/2013	2,22	0,40	-66,65	-9,55
12/07/2013	2,29	0,60	-66,65	-9,55
13/07/2013	2,34	1,80	-66,65	-9,55
16/07/2013	2,35	0,25	-51,99	-6,97
17/07/2013	2,32	3,28	-51,33	-6,98
18/07/2013	2,29	24,39	-65,63	-9,36
19/07/2013	2,32	0,50	-56,76	-7,55
20/07/2013	2,30	4,57	-60,01	-8,02
21/07/2013	2,26	27,91	-61,86	-9,41
22/07/2013	2,29	0,25	-65,41	-8,58
23/07/2013	2,27	0,25	-72,38	-9,34
24/07/2013	2,37	0,25	-40,85	-5,73
25/07/2013	2,36	0,25	-44,47	-6,07
26/07/2013	2,35	0,25	-47,06	-6,42
27/07/2013	2,29	2,52	-69,52	-9,05
28/07/2013	2,32	5,84	-65,28	-9,45
29/07/2013	2,27	13,95	-70,75	-8,81
30/07/2013	2,25	22,85	-60,64	-8,98
01/08/2013	2,70	0,25	-68,14	-8,85
02/08/2013	2,74	32,25	-60,68	-8,98
03/08/2013	2,75	5,56	-49,29	-7,58
05/08/2013	2,79	31,98	-64,53	-9,48
07/08/2013	2,78	0,50	-52,87	-7,16

08/08/2013	2,71	26,90	-67,36	-9,60
09/08/2013	2,66	18,78	-82,42	-11,08
10/08/2013	2,70	0,50	-65,84	-8,63
11/08/2013	2,73	0,25	-79,42	-10,19
12/08/2013	2,69	4,00	-65,42	-8,38
13/08/2013	2,74	2,60	-70,06	-9,12
14/08/2013	2,81	0,20	-53,20	-7,09
15/08/2013	2,80	1,00	-50,14	-6,77
16/08/2013	2,73	24,80	-45,16	-5,06
17/08/2013	2,73	3,60	-67,89	-8,91
18/08/2013	2,73	0,20	-64,48	-8,43
19/08/2013	2,73	10,90	-41,13	-6,95
20/08/2013	2,77	6,08	-55,26	-7,52
21/08/2013	2,70	16,24	-65,06	-8,96
22/08/2013	2,73	18,54	-60,89	-9,22
23/08/2013	2,72	32,75	-70,91	-10,38
24/08/2013	2,69	4,81	-68,99	-9,10
26/08/2013	2,73	42,14	-55,58	-8,87
27/08/2013	2,67	55,08	-77,78	-11,45
28/08/2013	2,77	1,00	-49,85	-6,76
29/08/2013	2,77	0,25	-52,07	-6,97
30/08/2013	2,71	10,41	-66,63	-8,38
31/08/2013	2,66	21,05	-64,53	-9,48
01/09/2013	2,16	1,52	-65,89	-8,66
02/09/2013	2,09	11,14	-69,06	-9,28
03/09/2013	2,10	13,44	-47,39	-7,18
04/09/2013	2,14	20,06	-78,37	-10,98
05/09/2013	2,13	0,25	-61,69	-8,07
06/09/2013	2,09	8,35	-67,21	-9,00
07/09/2013	2,13	9,64	-64,76	-9,45
08/09/2013	2,15	16,25	-55,64	-7,93
09/09/2013	2,14	27,17	-65,08	-9,20
10/09/2013	2,09	66,79	-71,33	-11,29
11/09/2013	2,08	8,12	-76,14	-10,04
12/09/2013	2,12	0,25	-65,19	-8,52
13/09/2013	2,14	9,38	-62,05	-9,16
14/09/2013	2,14	2,27	-57,15	-7,65
15/09/2013	2,17	42,41	-93,10	-12,69
16/09/2013	2,12	54,83	-60,46	-9,61
17/09/2013	2,15	20,81	-70,22	-9,88
18/09/2013	2,11	47,97	-62,47	-9,42
19/09/2013	2,16	3,79	-67,82	-8,92
20/09/2013	2,22	28,68	-65,41	-9,75
21/09/2013	2,19	1,75	-50,29	-6,79

22/09/2013	2,15	10,90	-53,83	-7,50
23/09/2013	2,16	16,25	-53,88	-7,67
24/09/2013	2,21	3,80	-41,91	-5,91
25/09/2013	2,17	94,45	-38,38	-6,78
26/09/2013	2,15	7,85	-56,24	-7,76
27/09/2013	2,15	0,50	-53,83	-7,23
28/09/2013	2,10	5,06	-75,92	-9,84
29/09/2013	2,09	39,07	-60,36	-8,96
30/09/2013	2,10	27,65	-59,55	-8,62
01/10/2013	0,59	68,06	-72,95	-9,61
02/10/2013	0,59	5,57	-67,95	-8,96
03/10/2013	0,59	38,59	-62,40	-9,33
04/10/2013	0,58	1,25	-72,49	-9,35
05/10/2013	0,60	4,57	-60,39	-8,09
06/10/2013	0,60	0,25	-89,59	-11,29
07/10/2013	0,60	13,71	-64,36	-9,20
08/10/2013	0,60	0,25	-46,76	-6,39
09/10/2013	0,60	0,75	-59,09	-7,81
10/10/2013	0,59	1,26	-61,89	-8,13
11/10/2013	0,58	10,38	-62,92	-9,13
12/10/2013	0,58	8,13	-67,77	-9,07
13/10/2013	0,58	2,01	-71,56	-9,32
14/10/2013	0,58	27,93	-56,22	-8,05
15/10/2013	0,58	23,33	-96,00	-12,45
16/10/2013	0,59	5,84	-62,96	-8,48
17/10/2013	0,58	29,43	-70,28	-10,15
18/10/2013	0,59	2,78	-72,96	-9,48
19/10/2013	0,59	1,51	-65,75	-8,60
20/10/2013	0,59	53,83	-67,81	-9,59
21/10/2013	0,59	0,50	-67,82	-8,80
22/10/2013	0,58	11,67	-86,60	-11,53
23/10/2013	0,59	38,08	-64,75	-9,61
24/10/2013	0,60	23,59	-75,76	-10,40
25/10/2013	0,59	37,05	-88,92	-12,38
26/10/2013	0,59	29,18	-69,98	-9,94
27/10/2013	0,59	0,75	-55,42	-7,39
28/10/2013	0,60	5,31	-68,44	-9,56
29/10/2013	0,59	0,25	-67,67	-8,78
30/10/2013	0,59	2,77	-56,34	-7,55
31/10/2013	0,58	20,03	-65,31	-9,82
01/11/2013	2,80	21,56	-78,08	-10,65
02/11/2013	2,74	8,09	-80,95	-10,69
03/11/2013	2,80	17,26	-71,18	-9,68
04/11/2013	2,81	1,02	-70,07	-9,12

05/11/2013	2,85	9,12	-66,87	-8,99
06/11/2013	2,82	15,22	-64,69	-8,89
07/11/2013	2,83	71,87	-51,62	-8,27
08/11/2013	2,80	43,41	-76,30	-11,13
09/11/2013	2,80	4,80	-77,81	-10,08
10/11/2013	2,84	0,75	-66,46	-8,65
11/11/2013	2,86	35,29	-63,85	-9,40
12/11/2013	2,89	6,08	-63,33	-8,42
13/11/2013	2,88	38,85	-49,88	-7,62
14/11/2013	2,87	18,00	-60,45	-8,49
15/11/2013	2,92	0,25	-52,29	-6,99
18/11/2013	2,87	4,55	-64,51	-9,13
19/11/2013	2,88	1,51	-70,30	-9,12
20/11/2013	2,88	0,25	-60,78	-8,01
21/11/2013	2,84	0,25	-63,00	-8,26
22/11/2013	2,85	0,25	-69,18	-8,98
23/11/2013	2,84	1,76	-68,68	-8,98
24/11/2013	2,81	1,26	-78,39	-10,08
25/11/2013	2,82	0,75	-66,65	-8,71
26/11/2013	2,85	7,86	-50,84	-6,00
27/11/2013	2,84	0,25	-67,30	-8,77
28/11/2013	2,90	0,25	-60,35	-8,01
29/11/2013	2,89	0,50	-71,17	-9,22
30/11/2013	2,86	0,50	-75,62	-9,76
01/12/2013	0,53	0,50	-58,18	-7,87
02/12/2013	0,52	0,25	-64,15	-8,47
03/12/2013	0,52	0,25	-76,81	-9,86
04/12/2013	0,53	0,50	-65,75	-8,60
05/12/2013	0,53	0,25	-67,35	-8,77
06/12/2013	0,53	0,50	-62,41	-8,21
07/12/2013	0,53	0,25	-61,28	-8,09
08/12/2013	0,52	0,50	-75,25	-9,71
09/12/2013	0,52	0,25	-57,37	-7,70
10/12/2013	0,53	1,00	-56,01	-7,51
11/12/2013	0,53	0,25	-56,32	-7,47
12/12/2013	0,54	1,26	-54,74	-7,30
13/12/2013	0,54	0,25	-51,22	-6,93
14/12/2013	0,53	0,25	-53,17	-7,17
19/12/2013	0,53	0,50	-68,99	-9,00
20/12/2013	0,54	0,25	-62,56	-8,27
21/12/2013	0,53	0,50	-58,54	-7,82
22/12/2013	0,53	1,26	-58,11	-7,76
23/12/2013	0,53	0,75	-64,04	-8,44
24/12/2013	0,52	0,25	-70,40	-9,30

25/12/2013	0,52	1,26	-71,22	-9,37
26/12/2013	0,53	1,26	-69,39	-9,15
27/12/2013	0,53	0,25	-69,91	-9,20
28/12/2013	0,54	0,25	-50,16	-6,99
29/12/2013	0,53	0,50	-66,99	-8,76
30/12/2013	0,54	0,25	-59,63	-7,96
31/12/2013	0,54	0,25	-52,91	-7,19
01/01/2014	0,72	0,50	-56,85	-7,62
03/01/2014	0,73	0,25	-56,37	-7,54
04/01/2014	0,73	0,50	-55,16	-7,40
05/01/2014	0,72	5,07	-51,58	-6,68
06/01/2014	0,71	0,25	-59,46	-7,84
07/01/2014	0,71	0,50	-64,82	-8,52
08/01/2014	0,71	0,25	-66,06	-8,64
09/01/2014	0,72	5,57	-69,92	-9,22
10/01/2014	0,71	0,25	-55,55	-7,50
11/01/2014	0,73	4,06	-54,51	-6,97
12/01/2014	0,73	0,50	-62,49	-8,28
13/01/2014	0,72	0,25	-34,27	-5,10
17/01/2014	0,73	0,50	-59,19	-7,86
18/01/2014	0,73	0,25	-55,89	-7,50
19/01/2014	0,72	0,50	-56,61	-7,60
20/01/2014	0,72	0,25	-54,59	-7,33
21/01/2014	0,73	0,50	-45,92	-6,38
22/01/2014	0,73	0,50	-52,42	-7,27
24/01/2014	0,73	0,25	-54,53	-7,47
25/01/2014	0,71	0,25	-50,78	-7,01
26/01/2014	0,73	0,50	-63,88	-8,53
27/01/2014	0,72	0,50	-55,72	-7,60
28/01/2014	0,73	0,25	-49,99	-6,88
29/01/2014	0,72	0,25	-47,46	-6,55
31/01/2014	0,74	0,50	-61,53	-8,23
02/02/2014	2,31	1,76	-58,09	-7,78
03/02/2014	2,37	3,03	-72,52	-9,47
04/02/2014	2,36	0,50	-63,03	-8,34
05/02/2014	2,39	1,76	-58,55	-7,83
07/02/2014	2,35	0,25	-48,50	-6,74
08/02/2014	2,40	3,55	-57,08	-7,87
09/02/2014	2,40	0,25	-42,71	-6,17
10/02/2014	2,40	6,61	-46,87	-6,72
11/02/2014	2,42	0,25	-46,85	-6,48
12/02/2014	2,43	0,25	-43,98	-6,16
13/02/2014	2,37	0,50	-47,51	-6,53
14/02/2014	2,37	7,61	-61,31	-8,34

15/02/2014	2,45	0,25	-22,17	-3,86
18/02/2014	2,42	0,25	-9,35	-2,63
20/02/2014	2,39	0,25	-39,46	-5,84
21/02/2014	2,39	0,25	-51,17	-7,09
22/02/2014	2,41	0,25	-32,56	-5,06
23/02/2014	2,39	0,25	-54,94	-7,40
24/02/2014	2,42	0,25	-33,67	-5,04
25/02/2014	2,42	0,25	-35,42	-5,26
26/02/2014	2,40	0,50	-44,33	-6,16
27/02/2014	2,40	41,64	-1,46	-2,18
28/02/2014	2,34	6,08	-59,64	-8,07
01/03/2014	5,58	9,15	-49,59	-7,12
03/03/2014	5,46	0,25	-62,40	-8,27
05/03/2014	5,53	1,75	-59,72	-7,98
06/03/2014	5,58	2,04	-46,00	-6,39
07/03/2014	5,54	0,25	-80,88	-10,47
05/04/2014	5,32	0,25	-25,12	-3,98
06/04/2014	5,37	0,25	-26,57	-4,13
07/04/2014	5,40	0,25	-24,04	-3,87
08/04/2014	5,38	2,01	-37,82	-5,43
09/04/2014	5,49	0,50	-1,46	-2,18
11/04/2014	5,31	0,25	-1,46	-2,18
13/04/2014	5,34	0,25	-22,63	-3,78
14/04/2014	5,22	0,25	-41,21	-5,82
15/04/2014	5,11	8,35	-58,79	-8,08
17/04/2014	5,16	11,92	-41,78	-6,36
18/04/2014	5,25	0,25	-31,56	-4,81
19/04/2014	5,31	25,14	-25,59	-4,54
20/04/2014	5,28	10,15	-37,15	-5,76
21/04/2014	5,24	0,25	-36,98	-5,44
22/04/2014	5,15	30,45	-12,64	-2,83
23/04/2014	5,18	0,25	-45,91	-6,48
25/04/2014	5,30	12,94	-26,51	-4,64
26/04/2014	5,15	1,01	-44,72	-6,31
27/04/2014	5,24	0,50	-36,05	-5,30
28/04/2014	5,23	1,50	-33,37	-4,99
30/04/2014	5,30	0,50	-29,24	-4,47

Anexo 4. Precipitación, evapotranspiración potencial, lluvia y concentraciones de $\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$ en el caudal para toda la serie temporal.

Fecha	Evapotranspiración (mm/d)	Lluvia (mm/d)	2H	18O
17/08/2012	1,43	27,55	-69,40	-9,70
19/08/2012	1,45	20,70	-64,85	-9,11
22/08/2012	1,44	28,40	-66,07	-9,34
23/08/2012	1,43	14,70	-66,67	-9,44
25/08/2012	1,44	25,10	-66,16	-9,62
30/08/2012	1,43	18,80	-64,59	-9,46
04/09/2012	1,49	41,00	-58,38	-8,86
05/09/2012	1,52	76,00	-65,24	-9,22
08/09/2012	1,52	13,80	-64,84	-9,16
10/09/2012	1,56	7,10	-57,35	-8,63
12/09/2012	1,52	14,10	-61,05	-8,69
13/09/2012	1,51	1,20	-55,12	-7,97
30/09/2012	1,52	9,60	-55,78	-8,12
01/10/2012	3,50	7,50	-58,94	-8,67
03/10/2012	3,49	41,00	-64,51	-9,46
04/10/2012	3,48	12,40	-66,82	-9,80
17/10/2012	3,35	21,30	-64,32	-8,56
18/10/2012	3,33	15,80	-67,77	-9,95
24/10/2012	3,27	36,50	-72,28	-10,48
25/10/2012	3,25	7,80	-65,65	-9,35
29/10/2012	3,37	6,50	-65,32	-9,50
03/11/2012	0,80	41,00	-57,93	-8,86
23/11/2012	0,79	3,20	-64,22	-9,56
24/11/2012	0,80	11,80	-61,60	-9,06
25/11/2012	0,79	28,60	-51,07	-7,88
12/12/2012	1,89	0,00	-65,77	-9,52
14/12/2012	1,83	0,00	-66,10	-9,67
16/12/2012	1,86	0,00	-65,58	-9,57
18/12/2012	1,84	0,00	-65,78	-9,51
20/12/2012	1,86	0,00	-65,48	-9,57
22/12/2012	1,90	0,00	-65,47	-9,71
24/12/2012	1,85	0,00	-65,07	-9,62
26/12/2012	1,88	0,00	-65,26	-9,54
28/12/2012	1,88	0,00	-65,66	-9,55
30/12/2012	1,93	0,00	-65,69	-9,44
01/01/2013	2,14	0,00	-66,50	-9,56
03/01/2013	2,13	0,00	-66,10	-9,59
05/01/2013	2,17	0,00	-65,85	-9,60
08/01/2013	2,13	0,00	-65,68	-9,62

10/01/2013	2,19	0,20	-64,91	-9,54
14/01/2013	2,12	0,20	-66,98	-10,03
16/01/2013	2,08	0,00	-66,80	-10,04
18/01/2013	2,13	0,00	-66,30	-9,96
20/01/2013	2,17	0,00	-66,35	-9,84
22/01/2013	2,20	0,00	-65,93	-9,72
24/01/2013	2,15	0,00	-63,99	-9,48
26/01/2013	2,18	0,00	-64,42	-9,44
28/01/2013	2,19	0,00	-64,57	-9,48
30/01/2013	2,19	0,00	-65,56	-10,11
01/02/2013	2,00	0,00	-65,57	-10,07
03/02/2013	1,90	19,50	-62,55	-9,48
05/02/2013	1,93	2,60	-63,95	-9,70
07/02/2013	1,93	1,00	-64,86	-9,91
09/02/2013	1,94	0,00	-64,75	-9,78
12/02/2013	1,94	0,00	-64,62	-9,58
15/02/2013	1,93	13,50	-63,56	-9,27
19/02/2013	1,93	0,00	-62,29	-9,19
21/02/2013	1,96	0,00	-63,07	-9,66
23/02/2013	2,00	0,00	-63,67	-9,49
25/02/2013	1,97	0,00	-64,10	-9,62
27/02/2013	1,99	0,00	-64,33	-9,60
02/03/2013	3,43	0,20	-64,09	-9,48
05/03/2013	3,56	41,00	-50,52	-7,91
07/03/2013	3,72	1,00	-61,94	-9,14
09/03/2013	3,66	0,00	-61,96	-9,07
11/03/2013	3,62	1,00	-62,08	-8,98
13/03/2013	3,60	0,00	-61,55	-8,86
15/03/2013	3,60	0,20	-62,63	-9,09
17/03/2013	3,62	0,40	-62,92	-9,13
19/03/2013	3,61	0,00	-62,82	-8,87
21/03/2013	3,55	0,00	-62,67	-9,42
23/03/2013	3,57	0,00	-62,73	-9,37
30/03/2013	3,66	0,00	-61,91	-9,15
07/04/2013	3,67	1,00	-58,36	-8,55
09/04/2013	3,72	0,00	-56,99	-8,50
11/04/2013	3,71	12,50	-57,78	-8,49
13/04/2013	3,68	0,00	-60,75	-8,75
15/04/2013	3,69	0,00	-56,31	-8,68
17/04/2013	3,70	3,20	-60,64	-8,83
19/04/2013	3,59	0,00	-58,64	-8,67
21/04/2013	3,48	8,50	-59,21	-8,94
23/04/2013	3,67	0,00	-58,98	-8,78
25/04/2013	3,70	7,80	-60,32	-9,03

27/04/2013	3,54	2,30	-58,79	-8,77
29/04/2013	3,57	0,00	-59,63	-8,87
01/05/2013	3,17	26,96	-52,60	-8,20
03/05/2013	3,14	3,50	-56,75	-8,80
05/05/2013	3,15	39,60	-51,62	-8,27
09/05/2013	3,12	23,10	-53,68	-9,00
12/05/2013	3,21	0,00	-55,00	-8,37
14/05/2013	3,24	0,00	-58,32	-8,65
16/05/2013	3,10	0,00	-61,23	-8,97
18/05/2013	3,20	0,00	-62,18	-9,12
20/05/2013	3,11	36,60	-59,92	-8,76
22/05/2013	3,04	92,50	-73,78	-10,67
24/05/2013	3,08	16,50	-66,43	-9,80
26/05/2013	3,18	0,00	-64,67	-9,70
28/05/2013	3,12	7,20	-64,17	-9,55
30/05/2013	3,06	15,50	-66,62	-9,67
01/06/2013	3,42	0,00	-66,48	-9,82
03/06/2013	3,52	59,30	-79,37	-11,49
05/06/2013	3,41	0,00	-66,44	-9,94
07/06/2013	3,48	1,00	-63,99	-9,60
09/06/2013	3,47	2,40	-64,52	-9,71
11/06/2013	3,47	4,00	-63,80	-9,48
13/06/2013	3,47	41,20	-68,68	-10,05
15/06/2013	3,44	0,00	-65,02	-9,52
17/06/2013	3,55	1,20	-64,71	-9,58
19/06/2013	3,37	0,80	-64,51	-9,38
21/06/2013	3,44	0,20	-64,92	-9,31
23/06/2013	3,41	13,20	-62,20	-9,19
25/06/2013	3,46	5,60	-63,95	-9,27
27/06/2013	3,44	7,00	-64,34	-9,39
29/06/2013	3,33	1,00	-66,14	-9,65
01/07/2013	2,26	1,81	-66,65	-9,55
03/07/2013	2,32	41,00	-65,41	-9,55
05/07/2013	2,32	2,60	-64,70	-9,61
07/07/2013	2,34	2,20	-64,54	-9,55
09/07/2013	2,33	1,20	-65,28	-9,45
11/07/2013	2,22	0,40	-63,85	-9,40
13/07/2013	2,34	1,80	-64,53	-9,48
15/07/2013	2,31	0,00	-63,97	-9,39
17/07/2013	2,32	3,28	-63,99	-9,29
19/07/2013	2,32	0,50	-64,84	-9,66
21/07/2013	2,26	27,91	-63,64	-9,45
23/07/2013	2,27	0,25	-65,09	-9,52
25/07/2013	2,36	0,25	-64,84	-9,44

27/07/2013	2,29	2,52	-65,20	-9,49
29/07/2013	2,27	13,95	-66,72	-9,59
31/07/2013	2,27	0,00	-60,89	-9,22
02/08/2013	2,74	32,25	-40,59	-6,69
12/08/2013	2,69	4,00	-58,57	-8,18
14/08/2013	2,81	0,20	-66,63	-8,38
16/08/2013	2,73	24,80	-61,32	-7,94
18/08/2013	2,73	0,20	-62,09	-9,94
20/08/2013	2,77	6,08	-59,84	-10,91
22/08/2013	2,73	18,54	-63,38	-8,81
24/08/2013	2,69	4,81	-65,03	-9,27
26/08/2013	2,73	42,14	-58,81	-8,93
28/08/2013	2,77	1,00	-62,61	-9,24
30/08/2013	2,71	10,41	-63,02	-9,07
01/09/2013	2,16	1,52	-64,36	-9,20
03/09/2013	2,10	13,44	-57,70	-7,55
05/09/2013	2,13	0,25	-63,43	-9,31
07/09/2013	2,13	9,64	-65,60	-9,40
09/09/2013	2,14	27,17	-62,06	-8,46
11/09/2013	2,08	8,12	-64,75	-9,22
13/09/2013	2,14	9,38	-63,84	-9,47
15/09/2013	2,17	42,41	-79,26	-11,39
17/09/2013	2,15	20,81	-64,11	-9,28
19/09/2013	2,16	3,79	-64,90	-9,44
22/09/2013	2,15	10,90	-65,62	-9,31
24/09/2013	2,21	3,80	-65,41	-9,35
26/09/2013	2,15	7,85	-62,99	-9,39
28/09/2013	2,10	5,06	-63,84	-9,38
30/09/2013	2,10	27,65	-65,99	-9,56
02/10/2013	0,59	5,57	-70,87	-10,08
04/10/2013	0,58	1,25	-65,77	-9,46
05/10/2013	0,60	4,57	-63,78	-8,88
06/10/2013	0,60	0,25	-64,48	-9,62
08/10/2013	0,60	0,25	-64,22	-9,58
10/10/2013	0,59	1,26	-64,33	-9,52
12/10/2013	0,58	8,13	-64,15	-9,42
14/10/2013	0,58	27,93	-61,60	-9,10
16/10/2013	0,59	5,84	-71,10	-10,12
18/10/2013	0,59	2,78	-65,80	-9,91
20/10/2013	0,59	53,83	-65,50	-9,58
22/10/2013	0,58	11,67	-69,18	-9,59
24/10/2013	0,60	23,59	-70,26	-9,47
26/10/2013	0,59	29,18	-77,28	-10,04
28/10/2013	0,60	5,31	-78,57	-11,46

30/10/2013	0,59	2,77	-65,41	-9,75
01/11/2013	2,80	21,56	-62,93	-9,31
03/11/2013	2,80	17,26	-67,98	-9,30
05/11/2013	2,85	9,12	-64,98	-9,20
07/11/2013	2,83	71,87	-62,56	-8,91
09/11/2013	2,80	4,80	-63,32	-9,21
11/11/2013	2,86	35,29	-64,36	-9,17
13/11/2013	2,88	38,85	-57,04	-8,33
15/11/2013	2,92	0,25	-63,02	-8,92
18/11/2013	2,87	4,55	-64,18	-9,30
20/11/2013	2,88	0,25	-63,07	-9,19
22/11/2013	2,85	0,25	-63,78	-8,87
26/11/2013	2,85	7,86	-58,38	-8,80
02/12/2013	0,52	0,25	-62,11	-8,34
04/12/2013	0,53	0,50	-64,20	-8,96
08/12/2013	0,52	0,50	-61,85	-8,04
18/12/2013	0,53	0,00	-63,34	-8,74
24/12/2013	0,52	0,25	-61,61	-9,36
26/12/2013	0,53	1,26	-58,97	-8,74
28/12/2013	0,54	0,25	-61,12	-9,18
30/12/2013	0,54	0,25	-62,98	-9,33
01/01/2014	0,72	0,50	-62,16	-9,57
03/01/2014	0,73	0,25	-63,12	-8,41
05/01/2014	0,72	5,07	-56,96	-7,71
07/01/2014	0,71	0,50	-63,12	-9,29
11/01/2014	0,73	4,06	-59,45	-8,24
13/01/2014	0,72	0,25	-60,10	-8,82
15/01/2014	0,74	0,00	-62,60	-9,32
17/01/2014	0,73	0,50	-64,13	-8,93
21/01/2014	0,73	0,50	-61,82	-9,02
27/01/2014	0,72	0,50	-63,80	-9,10
29/01/2014	0,72	0,25	-61,54	-8,73
02/02/2014	2,31	1,76	-61,23	-9,05
04/02/2014	2,36	0,50	-57,91	-8,68
10/02/2014	2,40	6,61	-61,97	-8,42
12/02/2014	2,43	0,25	-60,34	-8,94
16/02/2014	2,46	0,00	-59,94	-9,12
18/02/2014	2,42	0,25	-60,68	-9,19
22/02/2014	2,41	0,25	-62,19	-9,06
24/02/2014	2,42	0,25	-61,88	-8,93
26/02/2014	2,40	0,50	-60,70	-8,56
28/02/2014	2,34	6,08	-21,88	-1,27
02/03/2014	5,68	0,00	-40,08	-3,39
04/03/2014	5,53	0,00	-45,99	-5,65

09/03/2014	5,55	0,00	-59,06	-8,51
11/03/2014	5,55	0,00	-60,48	-8,70
21/03/2014	5,69	0,00	-59,53	-8,43
27/03/2014	6,05	0,00	-58,10	-8,19
29/03/2014	5,83	0,00	-59,83	-8,65
31/03/2014	5,85	0,00	-59,61	-8,68
02/04/2014	5,34	0,00	-59,44	-8,56
04/04/2014	5,05	0,00	-60,35	-8,91
06/04/2014	5,37	0,25	-57,00	-8,11
08/04/2014	5,38	2,01	-58,78	-8,54
10/04/2014	5,56	0,00	-57,65	-7,92
12/04/2014	5,43	0,00	-58,77	-8,41
14/04/2014	5,22	0,25	-60,47	-8,83
18/04/2014	5,25	0,25	-51,51	-7,65
20/04/2014	5,28	10,15	-26,96	-2,38
24/04/2014	5,28	0,00	-44,83	-6,03
26/04/2014	5,15	1,01	-48,27	-7,50
28/04/2014	5,23	1,50	-54,16	-8,26
30/04/2014	5,30	0,50	-57,80	-8,59

Anexo 4: Resultados del modelo para la estimación del tiempo de tránsito del agua en función al $\delta^2\text{H}$.

Periodo			alpha	Beta	MTT (días)	ED	Lluvia	Desviación estándar $\delta^2\text{H}$	Desviación estándar $\delta^{18}\text{O}$
all	ago-2012	ago-2014	0,234193	646,067803	151,304557	0,127344	6704,643	21,57	2,19
1 año	ago-2012	jul-2013	0,225222	1824,999999	411,03	0,30138	3150,85	20,86	2,55
1 año	sep-2012	ago-2013	0,198148	1825	361,62	0,38017	3278,362	20,69	2,51
1 año	oct-2012	sep-2013	0,19746	1825	360,36	0,372335	3432,814	20,16	2,45
1 año	nov-2012	oct-2013	0,183163	1825	334,27	0,371006	3125,22	19,88	2,40
1 año	dic-2012	nov-2013	0,180487	1825	329,39	0,383729	3203,958	19,24	2,32
1 año	ene-2013	dic-2013	0,182329	1825	332,75	0,386657	3038,856	18,45	2,22
1 año	feb-2013	ene-2014	0,179871	1825	328,26	0,372356	3078,228	17,83	2,16
1 año	mar-2013	feb-2014	0,12143	1825	221,61	0,381444	3106,932	17,90	2,17
1 año	abr-2013	mar-2014	0,113617	1412,698726	160,51	0,368808	2991,618	16,60	2,02
1 año	may-2013	abr-2014	0,106019	1032,231612	109,44	0,362159	2990,342	17,10	2,09
1 año	jun-2013	may-2014	0,01	718,655399	7,19	0,197805	3131,111	18,44	1,81
1 año	jul-2013	jun-2014	0,01	857,946824	8,58	0,232305	3276,899	20,70	1,81
1 año	ago-2013	jul-2014	0,01	1101,04182	11,01	0,237848	3176,585	21,83	1,85

1 año	sep-2013	ago-2014	0,01	1148,858454	11,49	0,220385	3159,33	21,63	1,90
6 meses	ago-2012	ene-13	0,90745	28,636602	25,99	0,213113	1976,624	13,01	1,70
6 meses	sep-2012	feb-13	0,01	1557,193856	15,57	0,255209	1735,074	16,04	1,88
6 meses	oct-2012	mar-13	0,106766	1825	194,85	0,125506	1503,432	21,44	2,54
6 meses	nov-2012	abr-13	0,23906	631,122193	150,88	0,127648	1001,268	24,73	2,96
6 meses	dic-2012	may-13	0,741139	259,190821	192,10	0,18007	928,624	28,73	3,40
6 meses	ene-2013	jun-13	0,464448	568,756877	264,16	0,226845	926,84	26,62	3,22
6 meses	feb-2013	jul-13	0,424407	683,639149	290,14	0,184853	1174,226	24,43	2,98
6 meses	mar-2013	ago-13	0,285738	1130,952092	323,16	0,294362	1543,288	22,58	2,76
6 meses	abr-2013	sep-13	0,373596	644,940977	240,95	0,30952	1929,382	19,43	2,39
6 meses	may-2013	oct-13	0,231527	1129,800041	261,58	0,403144	2123,952	16,51	2,08
6 meses	jun-2013	nov-13	0,01	2.928,97	29,29	0,435750528	2275,334	10,29	1,38
6 meses	jul-2013	dic-13	0,01	39,627974	0,40	0,466641	2112,016	9,65	1,28
6 meses	ago-2013	ene-14	0,01	43,079957	0,43	0,428952	1904,002	10,08	1,32
6 meses	sep-2013	feb-14	0,01	138,158547	1,38	0,141172	1563,644	12,91	1,58
6 meses	oct-2013	mar-14	0,01	404,605228	4,05	0,117975	1062,236	13,21	1,57
6 meses	nov-2013	abr-14	0,01	547,070656	5,47	0,151876	866,39	16,55	1,85
6 meses	dic-2013	may-14	0,01	904,142343	9,04	0,188809	855,777	21,10	1,80
6 meses	ene-2014	jun-14	0,01	1025,936482	10,26	0,271262	1164,883	22,12	1,79
6 meses	feb-2014	jul-14	0,01	1387,383909	13,87	0,257267	1272,583	21,40	2,03
6 meses	mar-2014	ago-14	0,01	1597,228608	15,97	0,397974	1595,69	23,26	1,93
4 meses	ago-2012	nov-12	0,655447	56,479616	37,02	0,210493	1740,91	12,36	1,67
4 meses	sep-2012	dic-12	0,151604	434,250207	65,83	0,206547	1693,672	14,18	1,72
4 meses	oct-2012	ene-13	0,035761	1825	65,26	0,110277	1287,788	14,44	1,74
4 meses	nov-2012	feb-13	0,061348	1825	111,96	0,100868	633,476	18,52	1,99
4 meses	dic-2012	mar-13	0,153658	1824,999989	280,43	0,087239	451,358	23,78	2,72
4 meses	ene-2013	abr-13	0,428765	370,482568	158,85	0,113818	409,194	15,87	1,73
4 meses	feb-2013	may-13	0,532788	469,248449	250,01	0,191689	692,91	29,02	3,53
4 meses	mar-2013	jun-13	0,338716	1067,440589	361,56	0,160115	885,438	28,05	3,42
4 meses	abr-2013	jul-13	0,483269	546,651562	264,18	0,135864	958,582	23,37	2,85
4 meses	may-2013	ago-13	0,352395	727,739331	256,45	0,316134	1175,496	19,03	2,40
4 meses	jun-2013	sep-13	0,01	411,684576	4,12	0,500122	1452,116	10,29	1,44
4 meses	jul-2013	oct-13	0,01	47,891398	0,48	0,453272	1606,306	10,36	1,38
4 meses	ago-2013	nov-13	0,01	62,616755	0,63	0,432706	1794,018	10,42	1,36
4 meses	sep-2013	dic-13	0,01	221,987625	2,22	0,356077	1454,166	9,76	1,26
4 meses	oct-2013	ene-14	0,01	33,42385	0,33	0,248103	933,202	9,73	1,26
4 meses	nov-2013	feb-14	0,458041	52,453728	24,03	0,049484	615,188	13,08	1,50

4 meses	dic-2013	mar-14	0,01	490,591126	4,91	0,100674	239,02	13,28	1,45
4 meses	ene-2014	abr-14	0,01	524,160266	5,24	0,16758	360,68	16,71	1,79
4 meses	feb-2014	may-14	0,01	865,779602	8,66	0,211543	745,793	22,82	2,03
4 meses	mar-2014	jun-14	0,01	1201,845246	12,02	0,395515	1055,41	22,06	1,93
4 meses	abr-2014	jul-14	0,01	1825	18,25	0,3793	1143,55	20,29	1,45
4 meses	may-2014	ago-14	0,055645	1825	101,55	0,315994	1344,49	24,53	SIN DATOS