



**CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL
DE INVESTIGACIÓN Y ENSEÑANZA**

**DIVISIÓN DE EDUCACIÓN
PROGRAMA DE POSGRADO**

Partición isotópica de agua verde y azul en Costa Rica

**Tesis a la consideración de la División de Educación y el Programa de
Posgrado como requisito para optar al grado de**

MAGISTER SCIENTAE

En Manejo y Gestión Integral de Cuencas Hidrográficas

ALBERTO ANSELMO IRAHETA RAMOS

Turrialba, Costa Rica

2019

Esta tesis ha sido aceptada en su presente forma por la División de Educación y la Escuela de Posgrado del CATIE y aprobada por el Comité Consejero del estudiante, como requisito parcial para optar por el grado de

**MAGISTER SCIENTIAE EN MANEJO Y GESTIÓN INTEGRAL
DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS**

FIRMANTES:



Laura Benegas

Laura Benegas, Ph.D.
Codirectora de tesis

Christian Birkel

Christian Birkel, Ph.D.
Codirector de tesis

Ney Ríos

Ney Ríos, M.Sc.
Miembro Comité Consejero

Isabel A. Gutiérrez-Montes

Isabel A. Gutiérrez-Montes, Ph.D.
Decana Escuela de Posgrado

Alberto Anselmo Iraheta Ramos

Alberto Anselmo Iraheta Ramos
Candidato

DEDICATORIA

“Este importante logro para mi vida profesional solo se lo quiero dedicar a mis tesoros que formaron parte de mi vida, mi bella madre **MARÍA RAMOS** y mi hermana **ANA IRAHETA** gracias por cuidarme desde el cielo, sus alas de ángeles me mantuvieron siempre de pie”.

MADRE:

“Gracias por darme el coraje de apreciar las cosas y de luchar por ellas por muy difíciles que parecieran, ese espíritu de guerrera que siempre te caracterizó fue el que me heredaste para alcanzar todo lo que hoy soy”.

HERMANA:

“Gracias por demostrarme que el dolor no existe y que siempre una buena sonrisa soluciona todo, es tu corazón alegre y sonriente que siempre me mantiene con energía y disposición para sonreírle a todo y encontrarle el lado amable y bondadoso, por ti mi sonrisa no se borrará jamás”

DIOS:

“Por darme salud y sabiduría, también por poner en mi vida a mis dos grandes guerreras y tesoros, siempre para ti sea la GRACIA”.

UN TAL JESÚS:

“Siempre estuvo conmigo en mis horas de tareas y estudio”

AGRADECIMIENTOS

A Dios por permitirme salud, sabiduría y por poner oportunidades de superación en mi camino, también por hacer caer esa GOTITA DE LLUVIA que siempre me acompañó con su dulce sonido.

A mi familia IRAHETA RAMOS, especialmente a mi padre “ALBERTO IRAHETA” por ser el mejor.

A mis hermanos “Miguel, Carlos, Silvia, Salvador, Ricci y Max, gracias por estar conmigo y apoyarme en todos mis proyectos de superación personal.

Al DAAD por brindarme el apoyo económico, sin ello no hubiera sido posible lograr este objetivo profesional, “UNA VEZ DAAD SIEMPRE DAAD”

A mis asesores que siempre estuvieron apoyándome en este proceso brindándome su tiempo, amistad y conocimientos PhD. Christian Birkel, PhD. Laura Benegas y M Sc. Ney Ríos.

A mis amigos M Sc. Erlin Escoto, M Sc. Oscar Ferreira, PhD. Henry Morazán y el Ing. Leónidas Morazán, siempre creyeron en mí y me brindaron todo su apoyo para que pudiera lograr estar aquí, culminando un capítulo más en mi libro de logros profesionales.

A mi familia en CATIE Jorge Escobar gracias por ir juntos a estudiar y compartir una nueva aventura, Alejandra gracias por hacer esa comida rica que siempre me mantuvo con fuerzas para estudiar.

A mis buenas amigas Estefany Ardón y Lucia, gracias por venir este año y hacer agradables mis días.

A mi hermano de otros padres que fue mi compañero de viajes y de muy buenas charlas Eliobeth Cueto **“Donde está tu espíritu aventurero”**, por más aventuras.

A mis compañeros de maestría que fueron mis amigos y compartimos muchas experiencias juntos, gracias colombiana (Yudy), gracias dominicana (Esthefany) y gracias panameños (Omar, Luis, María, Mayelin y Thayna).

A mi carnalito y compañero de apartamento Jesús López y mi amigo Carlos Zúñiga, gracias por estar acompañándome y compartir sus pláticas y experiencias.

A mis amigos Matthias, Ana, Malkin y Bora, gracias por todo su apoyo, tiempo, amistad y confianza.

A todos los profesores de la maestría de Manejo Integrado de Cuencas Hidrográficas de CATIE y a todo el personal que participo y facilitó mi proceso durante el tiempo de estudios.

CONTENIDO

DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTOS	IV
LISTA DE ACRÓNIMOS	IX
RESUMEN.....	X
ABSTRACT.....	X
CAPÍTULO I.....	1
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Justificación.....	2
1.2 Importancia.....	3
1.3 Objetivos y preguntas de investigación.....	4
1.3.1 Objetivo general.....	4
1.3.2 Objetivos específicos	4
1.3.3 Preguntas de investigación.....	4
2. MARCO REFERENCIAL.....	4
2.1 Ciclo Hidrológico del agua.....	4
2.1.1 Procesos del ciclo hidrológico	6
2.1.2 Transpiración y evaporación.....	6
2.2 Balance hidrológico.....	7
2.3 Hidrología isotópica	8
2.3.2 Enriquecimiento isotópico	9
2.3.3 Fraccionamiento isotópico.....	10
2.3.3.1 Tipos de fraccionamiento de los isótopos.....	11
2.4 Partición de agua en flujos azules y verdes	11
2.4.1 Balances de masa para la partición isotópica	11
2.4.2 Agua azul y verde	12
2.4.3 Importancia de la hidrología isotópica en la partición de los flujos de agua	13
3. PRINCIPALES RESULTADOS Y CONCLUSIONES.....	14
CAPÍTULO II	21
Artículo 1. Cuantificación de los flujos de agua azul y verde mediante isótopos estables del agua en Costa Rica.	21
RESUMEN.....	21
ABSTRACT.....	21

1. INTRODUCCIÓN	22
2. METODOLOGÍA	24
2.1 Zona de estudio	24
2.2 Proceso metodológico	25
2.2.1 Partición de T/ET	25
2.2 Balance de masa de isótopos estables	26
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	28
3.1 Transpiración en Costa Rica.....	28
3.2 Transpiración por Zona de Vida (ZV).....	30
3.3 Fracción de los flujos de agua verde y azul.....	32
3.4 Fracción de la transpiración en la precipitación	34
3.5 Pérdida de precipitación por transpiración en las ZV.	35
3.6 Pérdida de agua en el balance hidrológico de Costa Rica.....	37
3. CONCLUSIONES	38
4. RECOMENDACIONES.....	39
5. LITERATURA CITADA	39
Artículo 2. Partición del agua azul y verde a escala mensual para la cuenca del río San Carlos	44
RESUMEN.....	44
ABSTRACT.....	44
1. INTRODUCCIÓN	45
2. METODOLOGÍA.....	46
2.1 Área de estudio.....	46
2.2 Proceso metodológico	47
3. . RESULTADOS Y DISCUSIÓN	48
3.1 Transpiración en la cuenca de San Carlos.....	48
3.2 Partición de los flujos de agua azul y verde en la cuenca del río San Carlos.....	52
3.3 Fracción de precipitación por la transpiración	53
3.4 Pérdida de agua en el balance hidrológico de la cuenca San Carlos	54
4. CONCLUSIONES	56
5. RECOMENDACIONES.....	57
6. LITERATURA CITADA	58
ANEXOS	60

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Modelo isotópico en el ciclo hidrológico y equilibrio isotópico de los flujos de vapor y precipitación (Gat 1996 y Mook 2001 modificado de Craig y Gordon 1995).....	5
Figura 2. El ciclo hidrológico y la composición isotópica (tomado de IAEA).....	8
Figura 3. Enriquecimiento isotópico en el proceso de la transpiración y evaporación (Cernusak et al. 2016).	10
Figura 4. Condensación de la precipitación con fraccionamiento cinético entre el océano y el vapor .	11
Figura 5. Partición de la precipitación en flujo azul y verde (tomado de Falkenmark).....	13
Figura 6. Distribución de los flujos de agua azul y verde a nivel mundial (tomado de Falkenmark). ..	13
Figura 7. Flujos de agua con las firmas isotópicas. Fuente: Beyer 2018.....	14
Figura 8. Área de estudio: A) Zonas de Vida, B) Elevación y C) Precipitación anuales en Costa Rica.	24
Figura 9. Promedio anual de la transpiración en Costa Rica.	29
Figura 10. Distribución de la transpiración anual por zonas de vida de Holdridge.....	31
Figura 11. Fracción del flujo verde para Costa Rica	32
Figura 12. Fracción del flujo azul para Costa Rica.....	32
Figura 13. Fracción de la transpiración en la precipitación anual de Costa Rica.	35
Figura 14. Pérdida de precipitación por transpiración en las zonas de vida de Costa Rica.....	36
Figura 15. Pérdida de agua en Costa Rica por los diferentes procesos que influyen en el ciclo hidrológico.	38
Figura 16. Área de estudio: A) Cuenca del río San Carlos con puntos de muestreo isotópico mensual, B) Ubicación de la cuenca en Costa Rica, C) Elevación para el área de estudio y D) Precipitación anual para el área de estudio.....	46
Figura 17. Esquema metodológico utilizado para el modelo isotópico de separación de flujos T/ET..	48
Figura 18. Distribución de la transpiración mensual en la cuenca del río San Carlos, Costa Rica	49
Figura 19. Distribución espacial de la transpiración mensual para la cuenca del río San Carlos.....	50
Figura 20. A) Modelo aplicado a nivel nacional y B) Modelo aplicado en el área de la cuenca	51
Figura 21. Desviación absoluta de la transpiración en la cuenca del río San Carlos.....	52
Figura 22. A) Fracción de la E/ET y B) Fracción de la T/ET en la cuenca del río San Carlos, Costa Rica	53
Figura 23. Fracción de la transpiración de la precipitación mensual de la cuenca San Carlos, Costa Rica	54
Figura 24. Pérdida de agua en la cuenca San Carlos por Transpiración, Evaporación e Intercepción. .	56

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1. Distribución de la precipitación en promedio anual utilizado en el balance de masa para obtener la transpiración de Costa Rica.....	60
Anexo 2. Humedad relativa en promedio anual utilizado en el balance de masa para obtener la transpiración de Costa Rica.....	60
Anexo 3. Intercepción de la precipitación de Costa Rica en promedio anual, utilizado en el balance de masa para obtener la transpiración.....	61
Anexo 4. Temperatura (K) en promedio anual para Costa Rica, utilizada en el balance de masa para obtener la transpiración de Costa Rica.....	61
Anexo 5. Evapotranspiración anual de Costa Rica, utilizada en el proceso de fraccionamiento de los flujos de agua azul y verde.....	62
Anexo 6. Evapotranspiración mensual de la cuenca del río San Carlos, utilizada en el proceso de fraccionamiento de los flujos de agua azul y verde de la cuenca.	62
Anexo 7. Humedad relativa mensual de la cuenca del río San Carlos, utilizada en el proceso de partición de la transpiración.	63
Anexo 8. Precipitación mensual de la cuenca del río San Carlos, utilizada en el proceso de partición de la transpiración.....	63
Anexo 9. Intercepción de la precipitación mensual de la cuenca del río San Carlos, utilizada en el proceso de partición de la transpiración.	64
Anexo 10. Temperatura mensual de la cuenca del río San Carlos, utilizada en el proceso de partición de la transpiración.....	64

LISTA DE ACRÓNIMOS

BHMBS	Bosque Húmedo Montano Bajo Subtropical
BHMBT	Bosque Húmedo Montano Bajo Tropical
BHPT	Bosque Húmedo Premontano Tropical
BHT	Bosque Húmedo Tropical
BMHMBS	Bosque Muy Húmedo Montano Bajo Subtropical
BMHMBT	Bosque Muy Húmedo Montano Bajo Tropical
BMHMS	Bosque Muy Húmedo Montano Subtropical
BMHMT	Bosque Muy Húmedo Montano Tropical
BMHPT	Bosque Muy Húmedo Premontano Tropical
BMHT	Bosque Muy Húmedo Tropical
BPMBS	Bosque Pluvial Montano Bajo Subtropical
BPMBT	Bosque Pluvial Montano Bajo Tropical
BPMS	Bosque Pluvial Montano Subtropical
BPMT	Bosque Pluvial Montano Tropical
BPPT	Bosque Pluvial Premontano Tropical
BST	Bosque Seco Tropical
CFSR	Sistema de Pronóstico Climático
E	Evaporación
EEFH	Estación Experimental Forestal Horizontes
ET	Evapotranspiración
GLEAM	Global Land Evaporation Amsterdam Model
GWD	Datos Meteorológicos Globales
HR	Humedad relativa
I	Intercepción
IDW	Distancia Inversa Ponderada
NCEP	Centro Nacional para la Predicción Ambiental
K	Temperatura en Kelvin
P	Precipitación
Q	Caudal superficial
STDDEV	Desviación estándar
T	Transpiración
UNA	Universidad Nacional de Costa Rica
ZV	Zonas de Vida

RESUMEN

La investigación fue realizada en dos escalas de tiempo una anual para la república de Costa Rica, y la otra mensual para la cuenca del río San Carlos. Se aplicó un modelo con acoplamiento isotópico fundamentado en un balance de masa, el cual permite considerar cada uno de los componentes y flujos de agua mediante la composición isotópica teniendo como resultado la separación de la Transpiración/Evapotranspiración (T/ET). Cabe resaltar que la transpiración es uno de los procesos con mayor importancia dentro de los ecosistemas forestales, debido a esto, se desarrolló esta investigación con el objetivo de cuantificar el flujo en escala anual y mensual, para observar los movimientos en estas escalas de tiempo. Como resultado se obtuvo que el promedio anual de la transpiración es de 1086 mm significando esto el 85% de la ET, mientras que la evaporación ronda el 15%. Por otra parte, se encontró que Costa Rica tiene una pérdida de precipitación por proceso de transpiración a través de la cobertura vegetal del 38%, un 10% por intercepción y solo el 7% por evaporación directa. Asimismo, en escala mensual para la cuenca del río San Carlos se encontró que la transpiración es del 76% del aporte a la ET y el 24% de la evaporación, la variabilidad de la transpiración inicia un breve aumento en el mes de diciembre hasta mayo y en los meses de junio a noviembre se muestra la tasa más baja de transpiración, siendo marzo el mes con mayor promedio de transpiración 129 mm y septiembre presenta el promedio más bajo de transpiración 64 mm. Consecuentemente tenemos que 17%, de la pérdida de agua en el área de cuenca corresponde a la transpiración, 5% a la evaporación y un 5% a la intercepción.

Palabras clave: Procesos del ciclo hidrológico, balance de masa, hidrología isotópica, isótopo, fraccionamiento isotópico.

ABSTRACT

This research was performed based on two-time scales, an annual for the Republic of Costa Rica, and a monthly for the San Carlos river basin. A coupled isotope model was applied based on a mass balance, which allowed considering each of the components and water flows separating Transpiration/Evapotranspiration (T/ET). Transpiration is one of the most important processes within forest ecosystems as results showed an annual average transpiration of 1086 mm corresponding to 85% of the ET, while evaporation is around 15%. On the other hand, it was found that Costa Rica has a loss of precipitation by transpiration through vegetation cover of 38%, whereas interception constitutes 10% and direct evaporation only 7%. Moreover, the results for the San Carlos river basin it was found that transpiration is 76% of the ET contribution and 24% of evaporation, the variability of transpiration starts a brief increase in the month from december to may and in the months from june to november the lowest transpiration rate is shown, being march the month with the highest average transpiration 129 mm and september has the lowest average transpiration 64 mm. Consequently, we have that 17% of the loss of water in the basin area corresponds to transpiration, 5% to evaporation and 5% to interception.

Key words: Transpiration, green and blue water, mass balance, isotope hydrology, isotope, isotopic fractionation.

CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN

El ciclo hidrológico trata de conocer como el agua tiene su movimiento en este ciclo, desde que esta cae como precipitación y luego como es interceptada por la vegetación, hasta llegar al suelo, cómo se infiltra, su movimiento en la parte subterránea, cómo esta viaja hasta la parte de la superficie ya sea por medio de manantiales o a los océanos por escorrentía superficial. Es decir, considerando todo el recorrido que hace el agua para volver a formarse en precipitación y caer nuevamente (Brauman 2015). En este movimiento que realiza el agua para formar el ciclo hidrológico existen procesos como la evaporación y transpiración, dichos procesos son realizados por las plantas y la energía solar, estos contribuyen a que el agua ascienda en forma de vapor y regrese en forma de precipitación.

La partición isotópica o hidrología isotópica es una técnica en la cual se utilizan isótopos estables y radiactivos que están en el medio ambiente, es decir de origen natural o artificial, una vez identificados estos isótopos nos permitirán caracterizar el comportamiento o movimiento del agua en el ciclo hidrológico (Archana *et al.* 2014).

En esta investigación se trabajará con agua verde que se refiere a la intercepción o transpiración del agua por medio de las diferentes coberturas vegetales. De igual forma se tratará con el agua azul que se refiere a la evaporación de los cuerpos de agua ya sea subterránea o superficial. Según Enguita (2016) el señor Peter Easton realizó un informe donde describe que el manejo de la vegetación tiene una influencia directa sobre el balance hidrológico, de manera que si existe un incremento en la cobertura forestal implica una reducción del agua de escorrentía (agua azul) y un incremento del agua verde. También puede llamarse huella hídrica, por ejemplo, si queremos conocer la huella hídrica de un cultivo, entonces este necesita una cantidad de agua ya sea por sistema de riego extraída de pozos, ríos o cualquier otra fuente esto es agua azul, y la cantidad de agua almacenada de la precipitación por el cultivo es agua verde (Álvarez *et al.* 2016).

“La hidrología isotópica es una técnica nuclear que utiliza isótopos estables y radiactivos existentes en el medio ambiente tanto de origen natural como artificial para caracterizar el comportamiento dinámico del agua en el ciclo hidrológico o en otros procesos de la ingeniería en los cuales se le utiliza”. (IMTA 2009) Además utilizan los isótopos ambientales como el hidrógeno y del oxígeno, que se encuentran incorporados de manera natural en las moléculas del agua, por lo tanto, son fundamentales para realizar investigaciones sobre la naturaleza de los recursos hídricos. Los procesos en los que el agua realiza evaporación y condensación quedan marcados por una huella isotópica la cual varía de acuerdo con los antecedentes corridos en el ciclo hidrológico, de igual forma, esta huella permite descifrar el origen del agua desde su formación hasta un determinado punto del ciclo hidrológico. Por ejemplo, el agua subterránea, se le conoce su historial desde que se infiltra en el suelo hasta que hace su brote o salida en la superficie.

1.1 Justificación

Las variaciones de los isótopos estables y los mecanismos de recarga de las aguas subterráneas siguen siendo poco conocidos a través de los trópicos, particularmente en América Central. Los isótopos estables ($\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$) en el agua subterránea, agua superficial y la lluvia se utilizan para producir “paisajes isotópicos” de alta resolución. En el caso de Costa Rica, se estima una relación directa de isótopos de la precipitación en las aguas subterráneas (P / GW) esto aclara el dominante proceso de recarga de aguas subterráneas. Espacialmente, las proporciones de isótopos de agua subterránea y superficial representan la fuerte separación orográfica en las laderas del Caribe y el Pacífico inducidas por el transporte de humedad directamente desde el Mar Caribe y el Océano Pacífico tropical oriental (Sanchez-Murillo y Birkel 2016).

Según Sánchez-Murillo *et al.* (2013) los isótopos estables en la precipitación y el vapor de agua son indicadores útiles de la variabilidad climática, además, brindan información crítica del agua tanto a nivel regional como global, de igual forma, indica que el muestreo de los isótopos por un periodo de tiempo de una década puede proporcionar nuevos conocimientos sobre la dinámica del ciclo del agua, y que para el caso de los trópicos húmedos de América Central, hasta la fecha son muy pocos los registros de la hidrología isotópica. Es importante mencionar que estos autores en su investigación proponen realizar una investigación adicional en Costa Rica, en la que se debe evaluar espacial y temporalmente las variaciones isotópicas en los sistemas de aguas superficiales y subterráneas, en última instancia determinar las zonas críticas de recarga en todo el país.

La demanda de agua por parte de la cobertura vegetal y las poblaciones se ha convertido en un tema muy delicado, por lo que requiere mucho análisis y acciones concretas, Vásquez (2011) define a la demanda de agua por la cobertura vegetal como flujos de agua verde (transpiración) y flujo azul (evaporación) al agua que se encuentra en los diferentes cuerpos superficiales y subterráneos, y que son utilizadas por las poblaciones para todas sus actividades incluyendo los cultivos. Se considera que el 65% del agua de la superficie aportada por la precipitación es transformada en flujos de agua verde y el otro 35% constituye el flujo de agua azul (Malesu *et al.* 2007).

En una representación del balance hídrico de Costa Rica en alta resolución (cuadrícula de 100m^2), resaltó las áreas con una variabilidad espacial significativa de flujos hidrológicos, que demandan mejores esfuerzos de monitoreo hidrológico por parte de las agencias gubernamentales, para producir y aplicar planes efectivos de recursos hídricos que puedan tener en cuenta la resiliencia del agua subterránea bajo el cambio climático actual (decena) y los impactos de los choques climáticos (interanuales), con particular interés en las áreas dentro del Corredor Seco de América Central (Sánchez-Murillo y Birkel 2016).

Según Geyh (2000) nos encontramos en un rápido crecimiento poblacional combinado con el aumento constante de las necesidades de agua para uso agrícola y el desarrollo industrial, esto han impuesto una demanda severa sobre el recurso de agua dulce, disponibles en términos de cantidad y calidad, que requieren una evaluación y gestión coherente y cuidadosa de recurso hídrico para su

desarrollo sostenible. Es así, como se han propuestos estudios isotópicos aplicados a un amplio espectro de problemas hidrológicos relacionados con las aguas superficiales y subterráneas, así como los estudios ambientales en sistemas hidro-ecológicos.

Es así, como este campo de estudio ofrece una oportunidad única para estudiar la precipitación y procesos de aguas superficiales y subterráneas a un nivel relativamente bajo costo en comparación con flujo continuo o monitoreo del clima, que a menudo no es factible en los países en desarrollo.

1.2 Importancia

Según indica West *et al.* (2014) los isótopos estables en agua: deuterio y oxígeno 18 ($\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$) son indicadores importantes de patrones y procesos hidrológicos y ecológicos. Estos isótopos de agua se incorporan a los sistemas geológicos y biológicos de una manera predecible y se han utilizado ampliamente como trazadores en estudios hidrológicos, ecológicos y forenses. Es importante mencionar que cada vez más se está investigando sobre la composición isotópica estable del agua, y a su vez modelando en escalas espaciales grandes, los paisajes isotópicos tienen una gran utilidad, porque permiten realizar una documentación y visualización de la hidrología a gran escala, ya sea regional, continental o global, en otras palabras, la hidrología isotópica brinda la apertura de realizar interrogantes de la hidrología y sus procesos, que causan el patrón espacial, por ejemplo, patrones de precipitación estacional, coeficientes de precipitación, evapotranspiración e hidrología de captación.

La composición isotópica de las superficies naturales está determinada por factores muy importantes como: la cantidad de precipitación que alimenta directamente al cuerpo de agua, las fuentes superficiales y subterráneas de agua recarga, así como la tasa de entrada, la humedad del vapor atmosférico, humedad del aire, la tasa de salida de agua y el proceso de evaporación (Ferronsky y Polyakov 2012).

De acuerdo con International Atomic Energy Agency- IAEA (2004) las técnicas isotópicas ayudan a proporcionar información hidrológica rápida para grandes áreas, por otra parte, es un componente clave de los esfuerzos mundiales en la evaluación de los recursos hídricos y administración. Además, La hidrología de isótopos es ahora un reconocimiento completo disciplina de las ciencias hidrológicas. También la hidrología isotópica ayuda a realizar estudios que permitan identificar problemas que se pueden clasificar en, determinación del origen de las masas de agua, condiciones durante la formación, identificación y separación de componentes de agua, determinación de áreas de recarga de aguas subterráneas, caminos de flujo y mezcla, origen de los contaminantes del agua, reconstrucción de temperaturas de recarga para estudios de paleo clima, tiempo de residencia del agua en el sistema (edad del agua), cálculo de velocidades de flujo, evaluación de mezcla y dispersión, determinación de flujos de agua, tasas de recarga y tipos de cambio.

1.3 Objetivos y preguntas de investigación

1.3.1 Objetivo general

Desarrollar un modelo hidrológico con acoplamiento de isótopos a escala anual para Costa Rica, mensual para la cuenca del río San Carlos y a escala local en una parcela de bosque tropical seco en Guanacaste.

1.3.2 Objetivos específicos

- Cuantificar los flujos de agua verde y azul mediante isótopos estables del agua en costa rica.
- Partición de flujos de agua verde y azul a escala mensual mediante isótopos estables del agua en la cuenca del río San Carlos, Costa Rica.

1.3.3 Preguntas de investigación

PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN	
Objetivos específicos	Preguntas de investigación
OE 1. Cuantificar los flujos de agua verde y azul mediante isótopos estables del agua en costa rica.	1.1 ¿Cuál de los dos flujos aporta mayor vapor de agua a la evapotranspiración en Costa Rica? 1.2 ¿Cuál es el porcentaje del flujo de agua verde y azul para Costa Rica? 1.3 ¿Cuánto es la pérdida de agua en el modelo hidrológico de Costa Rica?
OE 2. Partición de flujos de agua verde y azul a escala mensual mediante isótopos estables del agua en la cuenca del río San Carlos, Costa Rica.	2.1 ¿Cuál de los dos flujos aporta mayor vapor de agua a la evapotranspiración en la cuenca del río San Carlos? 2.2 ¿Cuál es la tasa de transpiración para la cuenca del río San Carlos? 2.3 ¿Cuál es el mes que presenta la mayor tasa de transpiración para la cuenca 2.4 ¿Cuál es la pérdida de agua para la cuenca del río San Carlos?

2. MARCO REFERENCIAL

2.1 Ciclo Hidrológico del agua

El ciclo hidrológico es el movimiento dinámico del agua y contiene procesos permanentes en los cuales el agua realiza su recorrido pasando de un estado a otro, esto sucede por sobre o bajo la superficie

de la tierra y en la atmósfera (Ordoñez Gálvez 2011). El agua es un recurso que se recarga constantemente, pero también realiza una circulación o movimiento natural, pero esto no significa que toda el agua está disponible para usarse, en los últimos tiempos el flujo de la circulación del agua se encuentra en un escenario incierto que no se sabe si será limitado o acelerado por eventos del efecto del cambio climáticos (Oki y Kanae 2006).

La representación gráfica del ciclo hidrológico tiene muchos diseños, pero todos representan los procesos más importantes y que se deben desarrollar para que el agua tenga un ciclo completo, sin embargo, tenemos que los flujos de vapor (evaporación y transpiración) son los que mueven el agua a la atmósfera, asimismo, tenemos un flujo de retorno la precipitación, por eso, es importante conocer el componente isotópico de los flujos de vapor y el equilibrio isotópico entre ellos, para monitorear su movimiento por la superficie terrestre y el océano (Gat 1996 y Mook 2001 modificado de Craig y Gordon 1995), en la Figura 1 se detalla el modelo isotópico en el ciclo hidrológico. Por otra parte, se puede observar que la precipitación es la principal entrada de agua a un balance hidrológico, sin embargo, existen salidas o pérdidas de agua y estas se deben al proceso de la evapotranspiración, la cual está compuesta por la transpiración y la evaporación (Aeschbach 2012). Es por eso, que surgen métodos y técnicas como los trazadores y balance de masa mediante el uso de isótopos estables del agua, dando como resultado la cuantificación de estos flujos de pérdida de agua, para dar respuesta a la demanda de agua que un ecosistema en estado natural requiere más las actividades antropogénicas y así poder implementar estrategias de gestión del hídrico.

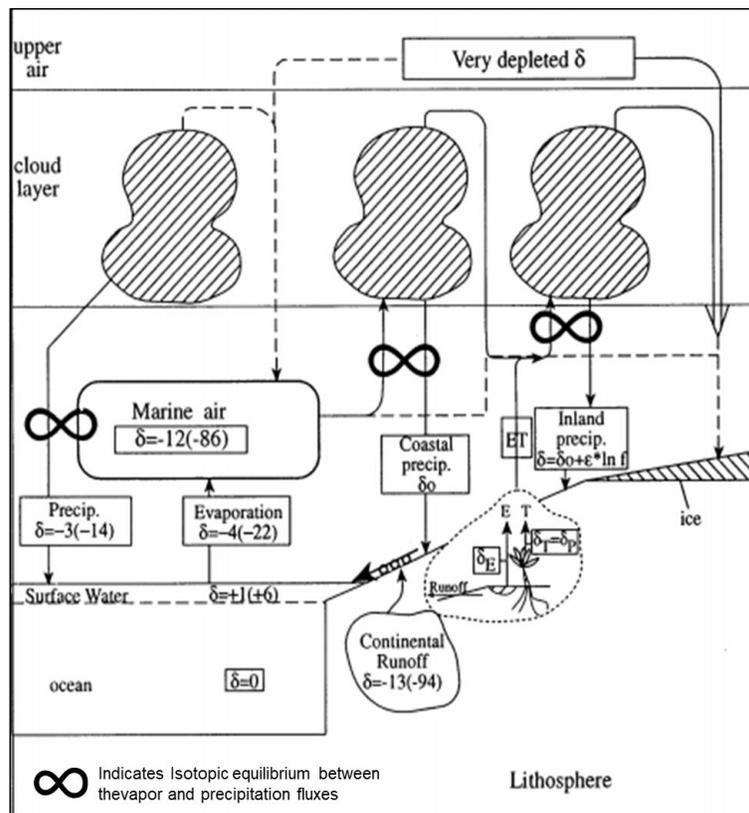


Figura 1. Modelo isotópico en el ciclo hidrológico y equilibrio isotópico de los flujos de vapor y precipitación (Gat 1996 y Mook 2001 modificado de Craig y Gordon 1995).

2.1.1 Procesos del ciclo hidrológico

Los procesos del ciclo hidrológico cumplen una función específica y ordenada para que el agua tenga la circulación por la superficie y subterránea, pero en los últimos tiempos estos procesos se han visto afectados o alterados por diferentes razones o actividades antropogénicas (Arellano y Ruiz 2018). Debido a los cambios de uso del agua y los efectos del cambio climático, es fundamental conocer o cuantificar la variación en tiempo y espacio de las variables o procesos que participan en el ciclo del agua (Ordoñez 2011).

Las fases o procesos dentro del ciclo hidrológico están estrechamente relacionados con los isótopos estables, estos muestran proporcionalmente las características e historial de las entradas y salidas del agua en el ciclo hidrológico (Gat 1996). Las entradas y salidas dentro del ciclo hidrológico son atribuidas a los procesos de precipitación, evapotranspiración y escorrentía (Bruijnzeel 1990).

Para el caso de la precipitación representa la principal entrada al ciclo hidrológico, esta puede caer de forma líquida o sólida, su formación está regulada por los cambios en la temperatura o presión atmosférica, a medida que la lluvia cae en el suelo, se producen varios procesos que modifican la composición de isótopos de la precipitación entrante (Musy 2001 citado por UNESCO 2006). Según Gat y Gonfiantini (1981) la mayor parte de cambios isotópicos del ciclo hidrológico ocurre en la parte atmosférica, aunque siempre existe una relación directa con las aguas superficiales ya que entran en contacto con la atmosfera al evaporarse, de igual forma sucede con las aguas subterráneas que adquieren una signature isotópica con la infiltración.

Los principales procesos del ciclo hidrológico que tienen un efecto sobre la firma isotópica del agua son (Gat 1996):

- La formación del vapor atmosférico por evaporación bajo diferentes rangos de humedad.
- Condensación y agotamiento gradual tanto del vapor como de las continuas precipitaciones, bajo gradientes de temperaturas.
- Evaporación del agua del suelo y superficial, que enriquece el agua residual en ambos isótopos.
- Mezcla de aguas en la superficie o subsuelo, un proceso que a menudo ocurre en pozos abiertos que pueden conectar y muestrear zonas de acuíferos poco profundos y profundos.

Respecto a la composición de isótopos en la precipitación está estrechamente relacionada con características propias de la zona o escala espacial, estas características pueden ser la altitud, distancia de la costa con tierras continentales, temperatura ambiental, cantidad, duración, intensidad e intermitencia de precipitación (IAEA 1970). El tiempo de duración de la precipitación, está definida por la condensación de las moléculas de agua que contienen los isótopos más pesados, esto dura hasta que todos los isótopos pesados se terminan mediante la precipitación (Gat *et al.* 2001).

2.1.2 Transpiración y evaporación

Las investigaciones realizadas a nivel global revelan que la transpiración es uno de los procesos que más aporta vapor de agua a la atmosfera, aproximadamente entre el 64 y 13 %, también menciona que la

mayor parte del agua que corresponde a la evaporación es proveniente del suelo y no de las corrientes superficiales (Good *et al.* 2015). De igual forma, lo señala Jasechko *et al.* (2013) y Su *et al.* (2019) quienes encontraron en sus investigaciones que la transpiración representa entre 80 y 90 % de la evapotranspiración.

El agua en la atmósfera proviene de flujos de evaporación de agua en la superficie de la tierra, principalmente desde los océanos y los cuerpos de agua abiertos, también de la transpiración de las diferentes coberturas vegetales, en ambos procesos de evaporación y transpiración la pérdida de agua es por vapor o gas (Easton y Bock 2015). Estos dos combinados forman la evapotranspiración dentro del ciclo del agua, el cual es fundamental conocer para la planificación y gestión de los recursos naturales (Đukić y Mihailović 2012). Pero hay algo muy importante que menciona Pidwirny (2006) la evapotranspiración no se puede dar si el agua no se encuentra disponible.

Por la gran importancia que representa la evapotranspiración dentro del ciclo hidrológico se han desarrollado múltiples modelos simples y complejos, desde a utilizar solo la temperatura del aire como los propuestos por Thornthwaite y Hargreaves-Samani, hasta los que involucran el balance energético en términos de vegetación Penman-Monteith, que también se puede ajustar como lo hizo la FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación) (Delgado *et al.* 2017).

2.2 Balance hidrológico

Un balance hidrológico son las entradas (precipitación) y salidas (Escorrentía y evapotranspiración) de flujos de agua y su variación de volumen almacenada en determinado espacio o territorio geográfico (Vargas *et al.* 2012). De igual forma, Sánchez Cohen *et al.* (2013) describe al balance hidrológico como un modelo que permite la cuantificación del volumen de agua en determinado tiempo y espacio, también considera importante realizar aplicación de modelos mensuales o anuales para conocer la variación que pueda existir en los movimientos de los flujos de entradas y salidas. Para otros autores realizar un balance hidrológico no solo es funcional para cuantificar los flujos y almacenamientos de agua, si no como los procesos de este se interrelacionan con las actividades de cambio y uso de suelos, más los posibles efectos en la variabilidad climática, incluso son útiles para predecir o evitar algunas consecuencias de la gestión del recurso hídrico (Amador-García y Mendoza 2016).

Existe una diferencia entre balance hidrológico y balance hídrico, este último consiste en la oferta de agua que hay en un determinado ecosistema natural y la demanda que realizan los distintos sectores o usuarios (Universidad Rafael Landívar 2015). El balance hidrológico para cualquier zona, cuenca natural o cualquier masa de agua, indica los valores relativos de entrada y salida de flujo y la variación del volumen de agua almacenada en la zona o masa de agua, por lo general los datos para realizar un balance hidrológico corresponde a un año hidrológico, pero este no debe ser un año natural (Instituto de Hidrología de España y Unesco 1981).

2.3 Hidrología isotópica

Con una alta expectativa de dar respuesta a muchas preguntas que surgían sobre temas de agua y la posible problemática que este recurso enfrentaría por actividades antropogénicas y el crecimiento de la población la Agencia Internacional de Energía Atómica incluye uso de técnicas como isótopos estables del agua (IAEA 1970). Desde entonces el término hidrología isotópica se está implementando como prácticas científicas que utilizan técnicas de isótopos, para estudiar el origen, almacenamiento y movimiento del agua en el ciclo hidrológico (IAEA 1984). Estudios realizados en la India demuestran que el uso de isótopos en la hidrología se ha convertido en una técnica clave e importante que debe fomentarse, ya que su aplicación es amplia y brinda una gama de información sobre la interacción aguas superficiales-subterráneas, recarga, contaminación entre otras, dando lugar a la gestión y manejo del recurso hídrico (Archana *et al.* 2014).

La hidrología por su dinámica en la atmósfera, por sobre y bajo el suelo, es más factible monitorearla con trazadores naturales, uno de estos trazadores son los isótopos que permiten brindar información de cada evento o movimiento que el agua realiza en cualquier escala de tiempo y espacio (Šanda *et al.* 2009). Esta técnica de trazadores permite abordar estimaciones de la saturación y flujo de recarga (nueva o vieja) del agua en el suelo, especialmente en unidades espaciales de manejo como las cuencas (Holko *et al.* 2011).

En la actualidad el uso de los isótopos estables de $\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$, son fundamentales para abordar los procesos del ciclo hidrológico, de igual forma, para la investigación en todos los recursos naturales, se considera que el proceso de evaporación tiene un efecto directo sobre la variación que existe en la composición isotópica del agua, es decir, partículas con moléculas ligeras son más rápidas para volatizarse que las de un isótopo pesado. Por lo que las aguas que se evaporan del océano contienen menos deuterio ($\delta^2\text{H}$) y oxígeno ($\delta^{18}\text{O}$) (Gat 1996) (figura 2).

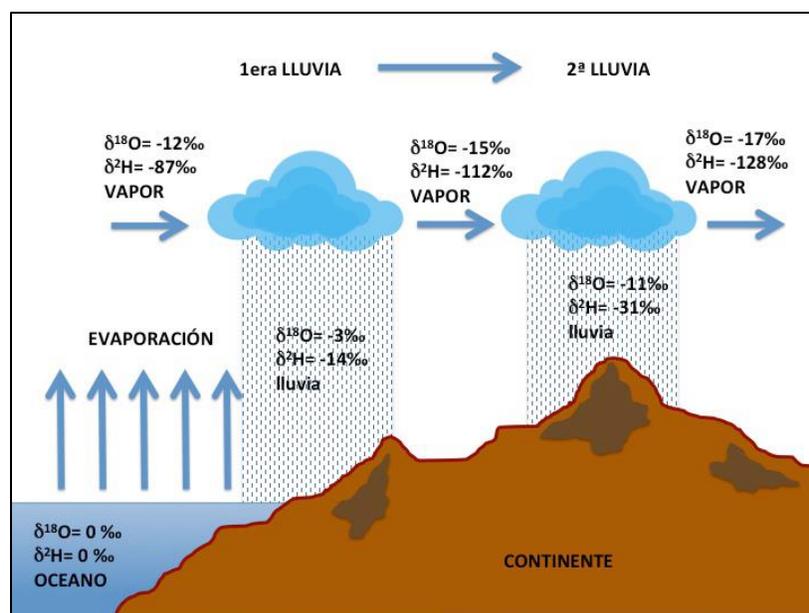


Figura 2. El ciclo hidrológico y la composición isotópica (tomado de IAEA).

Para el profesor Aeschbach (2012) del Instituto de Física Ambiental de la Universidad de Heidelberg de Alemania, la hidrología isotópica mediante el uso de los isótopos estables puede dar respuesta a dos grandes problemas:

1. Determinación del origen de las masas de agua y las condiciones durante la formación. Este comprende los siguientes factores:
 - Identificación y separación de componentes de agua.
 - Determinación de áreas de recarga de aguas subterráneas, caminos de flujo, mezcla.
 - Determinación del origen de los contaminantes.
 - Reconstrucción de temperaturas de recarga para estudios de paleoclima.
2. Determinación del tiempo de residencia del agua en el sistema (edad del agua). Al igual que el primero tiene los siguientes factores:
 - Cálculo de velocidades de flujo, evaluación de mezcla y dispersión.
 - Determinación de flujos de agua, tasas de recarga y tipos de cambio.
 - Estudio de transporte y degradación de contaminantes.

Por lo descrito anteriormente, más las tendencias, desafíos y la presión de los impactos generados por la población, han creado una enorme preocupación por proteger y hacer uso sostenible del recurso hídrico, cada año se potencia el uso de herramientas científicas y aplicaciones eficaces como la hidrología isotópica para dar seguimiento y monitoreo al ciclo hidrológico, y la información obtenida usarla para la toma de decisiones (Froehlich *et al.* 1998 y Peralta Vital *et al.* 2015).

2.3.1 Isótopos estables del agua

Los isótopos se clasifican en estables y radiactivos, existen aproximadamente 300 isótopos estables en los ecosistema o naturaleza y más de 1200 radiactivos (Raya 2003). El agua está formada por moléculas de hidrogeno y oxígeno (H₂O) (Sharp 2001 y Vigasin 2009). El hidrogeno en su estado natural contiene dos isótopos estables (protio ¹H y deuterio ²H o D), y un radiactivo (tritio ³H o T), el oxígeno está compuesto por tres isótopos estables ¹⁶O, ¹⁷O y ¹⁸O (Valenzuela *et al.* 2013).

En este caso nos enfocaremos en los isótopos estables del agua, para realizar estudios de monitoreo, movimiento del agua en ciclo hidrológico, recarga acuífera entre otros parámetros o variables que se pueden medir mediante el muestreo de agua subterránea, superficial, precipitación entre otras, los investigadores utilizan los isótopos estables de oxígeno $\delta^{18}\text{O}$ y deuterio $\delta^2\text{H}$ (Cifuentes *et al.* 2015).

3.3.2 Enriquecimiento isotópico

Cernusak *et al.* (2016) explica que el enriquecimiento isotópico depende de las firmas isotópicas de cada fuente de agua, por ejemplo, menciona que el agua que se evapora directamente del suelo o de las fuentes mantienen menos enriquecimiento que el agua que viaja por los conductos del suelo o que es

trasladada por las raíces de las plantas, los isótopos más ligeros son los que se evaporan primero, y solo quedan los pesados que tienen mayor enriquecimiento y su evaporación es lenta.

Por otra parte realiza una explicación de cómo surge el enriquecimiento en la hojas de los árboles y como el proceso de la transpiración influye, de esta manera, encontramos que el enriquecimiento que normalmente se da en la hoja disminuye si la tasa de transpiración es alta, o si el recorrido del agua desde donde la toma la planta es sinuoso y tiene mucha longitud, en la siguiente figura 3, Cernusak *et al* (2016) esquematiza el efecto de la transpiración en el enriquecimiento isotópico, el color rojo indica enriquecimiento alto de los isótopos estables $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$, el amarillo intermedio y el azul nivel bajo, el grosor de las flechas la tasa de transpiración y la sinuosidad la longitud del trayecto que viaja el agua.

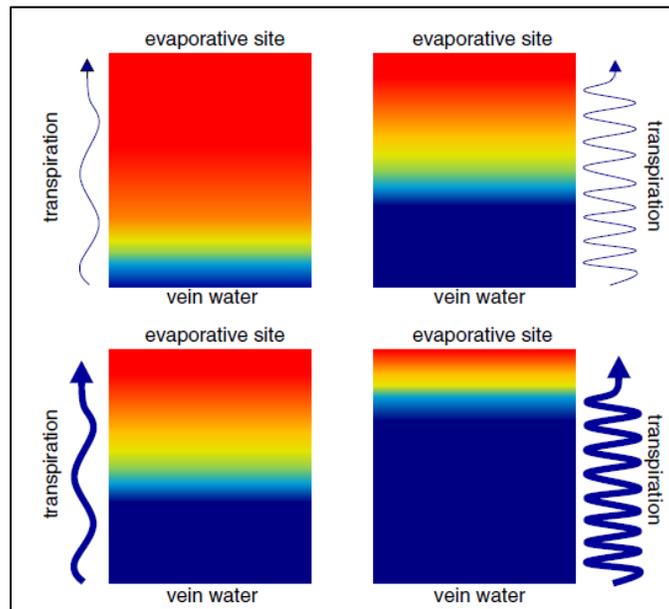


Figura 3. Enriquecimiento isotópico en el proceso de la transpiración y evaporación (Cernusak *et al.* 2016).

2.3.3 Fraccionamiento isotópico

Está definido como el “fenómeno por el cual la composición isotópica de un elemento de determinado compuesto cambia por medio de la transición del compuesto de un estado físico o de una composición química a otra” (Mook 2002). El fraccionamiento cinético de “la composición isotópica de la precipitación es una función de la temperatura, la humedad relativa y la velocidad de evaporación en diferentes latitudes y longitudes” (Singh 2016). Si lo observamos desde el punto de vista de las variaciones en el contenido de $\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$, se encontrará que las aguas están estrechamente relacionadas con el fraccionamiento isotópico que ocurre durante la evaporación y la condensación del agua (Ferjan 2013).

2.3.3.1 Tipos de fraccionamiento de los isótopos

Gat (1996) describe que el fraccionamiento isotópico está determinado por tres grandes factores:

- El fraccionamiento de isótopos de equilibrio de la transición de fase líquida a vapor.
- Fraccionamiento resultante de la difusión a través de la capa límite de aire.
- El flujo de retorno de la humedad atmosférica.

La formación del vapor en los océanos mediante la evaporación posee las temperaturas más elevadas, conforme el vapor se traslada o viaja a altitudes más altas (tierras continentales) la condensación se vuelve más continua, esto pasa porque existen temperaturas más inferiores que las oceánicas. En el esquema del efecto de condensación para agua meteórica se produce un gran fraccionamiento cinético entre el océano y el vapor, cuando este avanza a las tierras continentales la precipitación se vuelve más continua, esto es por causa de las concentraciones isotópicas que se ven afectadas por la temperatura y altitud (Soler *et al.* Sf; Rodríguez-Arévalo *et al.* 2007) (figura 3).

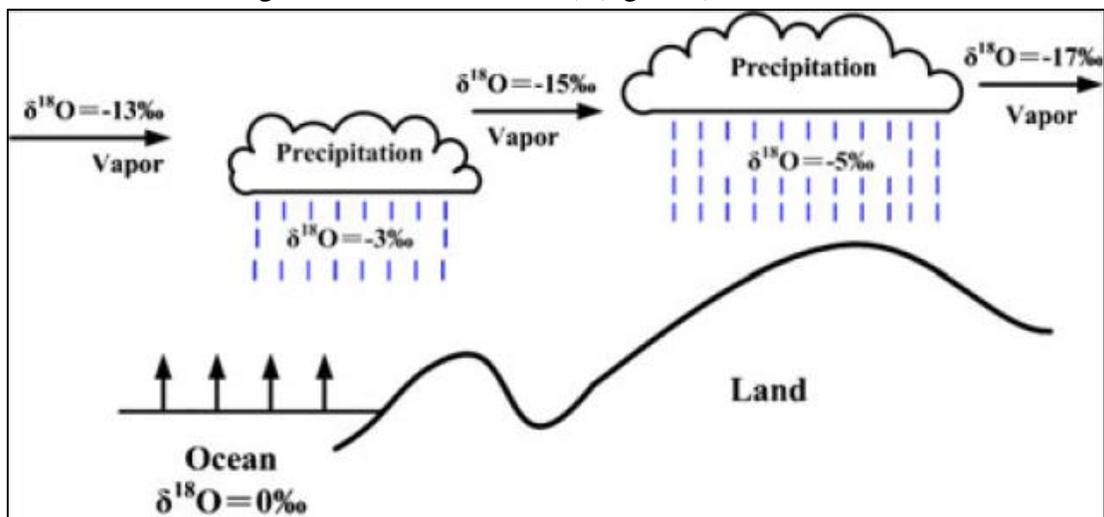


Figura 4. Condensación de la precipitación con fraccionamiento cinético entre el océano y el vapor (tomado de Sharp 2007 citado por Yeh *et al.* 2011).

El fraccionamiento de isótopos que acompaña al proceso de evaporación es un factor importante en la variabilidad de la composición isotópica dentro del ciclo del agua (Gat *et al.* 2001).

2.4 Partición de agua en flujos azules y verdes

2.4.1 Balances de masa para la partición isotópica

Los autores Camarero *et al.* (2015) describen que los balances de masas principalmente se fundamentan en la cuantificación de los flujos, como lo es el caso de los isótopos estables del $\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$, que se utilizan como trazadores para cuantificar las masas de agua que circulan en un determinado espacio, y los cambios experimentados a lo largo del ciclo hidrológico. El recorrido y fuente de abastecimiento del agua en el suelo y la atmosfera puede ser monitoreada y cuantificada por un balance

de masas, a través de la variación y composición de los isótopos estables en el tiempo ya sea anual o mensual (Congjian *et al.* 2016). La utilización de isótopos como trazadores permite identificar la procedencia del agua que está en la xilema de las plantas y la que permanece en los cuerpos superficiales y subterráneos, también permite la medición de la evapotranspiración por medio de la evaporación y transpiración (Reyes-García y Andrade 2007).

Un balance de masa de isótopos permite medir la cantidad de agua utilizada en la evaporación y la transpiración, el cálculo del balance se basa en dos componentes: el agua que las plantas absorben hasta que sale por las estomas, el agua que se evapora de la interceptación y directamente del suelo. En este balance es importante tomar en cuenta que la transpiración no es afectada por fraccionamiento isotópico, caso contrario de la evaporación que si presenta afectación por fraccionamiento de isótopos. La precipitación que es interceptada por la vegetación debe ser restada de la precipitación neta, ya que estas dos presentan una misma composición isotópica, por eso se debe utilizar los valores de la precipitación neta, así como, Ferretti *et al.* (2003) y Sutanto *et al.* (2012) presentan la formulación del balance de masa de la siguiente forma: $\chi_i \delta_i + \chi_r \delta_r = \chi_f \delta_f + \chi_v \delta_v + \chi_t \delta_t^1$.

Muchas investigaciones se han realizado utilizando la combinación de isótopos estables con otras técnicas o métodos como el balance de masas, ya que permite estimar la contribución de la evaporación y la transpiración a la evapotranspiración (ET) en sus componentes para diferentes estaciones (Tarin *et al.* 2014). De igual forma, Jasechko *et al.* (2013) utiliza un modelo de balance de masa fundamentado en las firmas isotópicas de todos los componentes de la evapotranspiración, permitiendo de esta forma, la separación de la transpiración y la evaporación para conocer cuánto aporta cada una a la ET.

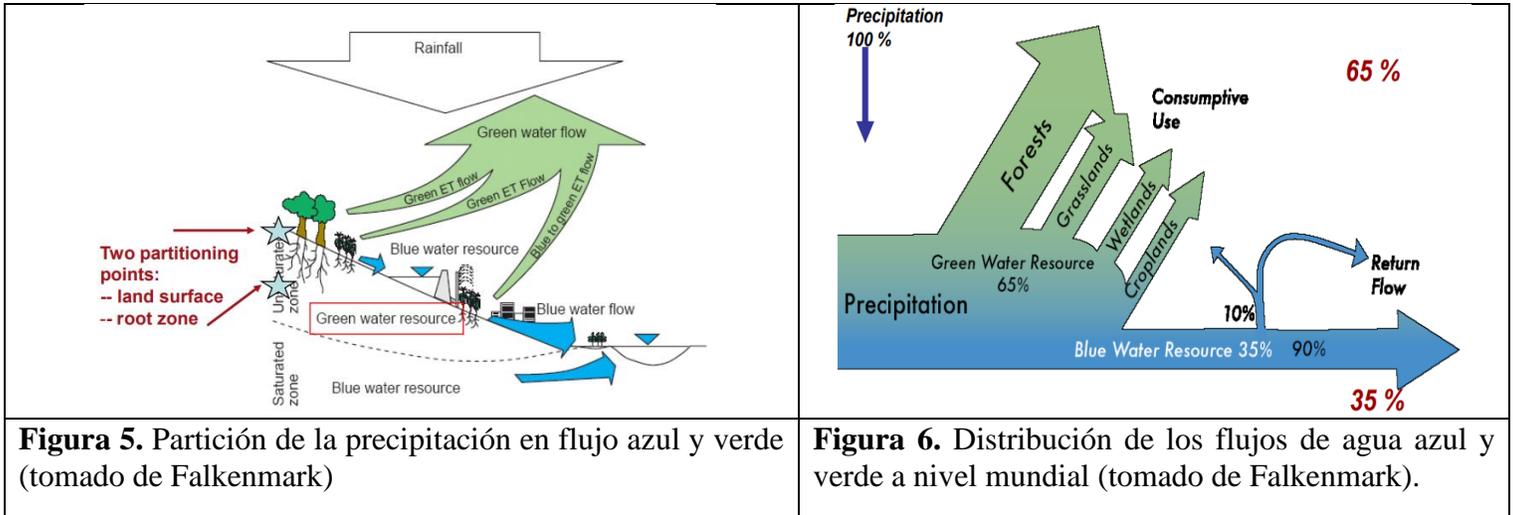
2.4.2 Agua azul y verde

El agua verde es el agua de la precipitación que se almacena en el suelo y que es transpirada por las plantas, mientras que el flujo de agua azul se refiere a todos aquellos cuerpos de agua superficial y subterránea, entre ambos flujos existe una relación muy estrecha, por ejemplo los cuerpos de agua en muchas ocasiones son utilizados como sistemas de riego de cultivos o plantaciones, de igual forma, la saturación del suelo puede formar un cuerpo de agua, luego esta es evaporada, dando paso a la evapotranspiración (Clothier *et al.* 2010). El agua azul y verde se describe como la partición de flujos, donde el agua vuelve a evaporarse directamente desde el suelo o por la transpiración de las plantas (Llamas 2005).

Muchos autores en sus estudios hablan de huella hídrica o agua virtual, haciendo una partición de flujos y calificándolos como azul (agua superficial o subterránea) y verde (agua temporalmente en el suelo o en las coberturas vegetales, que luego es transpirada), en esta partición de flujos colocan a la precipitación como el 100% de las entradas (Falkenmark 2003 y Salmoral *et al.* 2011).

¹ Los subíndices $j = i, r, f, v, o t$ representan la fracción de agua en el suelo inicial, la lluvia, el suelo final y fracciones transpiradas, respectivamente; $\chi_j = m_j/m_{total}$.

La figura 5 muestra la partición de la precipitación en los flujos de agua azul y verde, y como estos flujos se interrelaciona mediante la evapotranspiración, es decir el agua verde es transpirada (T) y el agua azul es evaporada (E), mientras que la figura 6 representa el porcentaje de distribución que estos flujos de agua azul y verde tienen a nivel mundial (Falkenmark 2009 y Malesu *et al.* 2007).



La partición de los flujos azules y verdes están relacionados de manera simplificada en el ciclo hidrológico ya que ambos participan en este proceso, sin embargo, es necesario conocer la relación de estos dos flujos, para establecer un equilibrio y mantener la conservación del recurso y la interrelación que este tiene con los bosques, cultivos y actividades humanas (Robinson *et al.* 2011). Una de las alternativas que existen para conocer la partición de estos flujos es la cuantificación de agua en el balance hidrológico el cual incluye entradas y salidas (Biro y Gracia 2011). Muchas de las investigaciones realizadas para cuantificar los flujos de agua azul y verde utilizan modelados de procesos hidrológicos, en la calibración de estos modelos es necesario considerar los flujos de agua que están sin ninguna alteración y los que ya tienen alteración por actividades humanas, para conocer cómo es su comportamiento o dinámica (Zang *et al.* 2012; Botter *et al.* 2010).

2.4.3 Importancia de la hidrología isotópica en la partición de los flujos de agua

Una de las mayores importancias de la hidrología isotópica en los flujos de agua es que se puede identificar la interacción que existe entre ellos en estado natural, origen del agua, fuentes de abastecimiento de agua para la planta, además, de monitorear los procesos del ciclo hidrológico (Valenzuela *et al.* 2013). Por otra parte, permite identificar mediante las firmas isotópicas cual es la procedencia del flujo ya sea en el suelo como en las plantas, da apertura al análisis de la pérdida de agua antes y después de un evento de lluvia. Además de como las plantas pueden transportar el agua de distintas profundidades del suelo, con la utilización de la hidrología isotópica se puede monitorear esa interacción que existe entre planta-suelo-atmósfera, que cada proceso tiene sus propias firmas isotópicas, así como lo explica la figura 7.

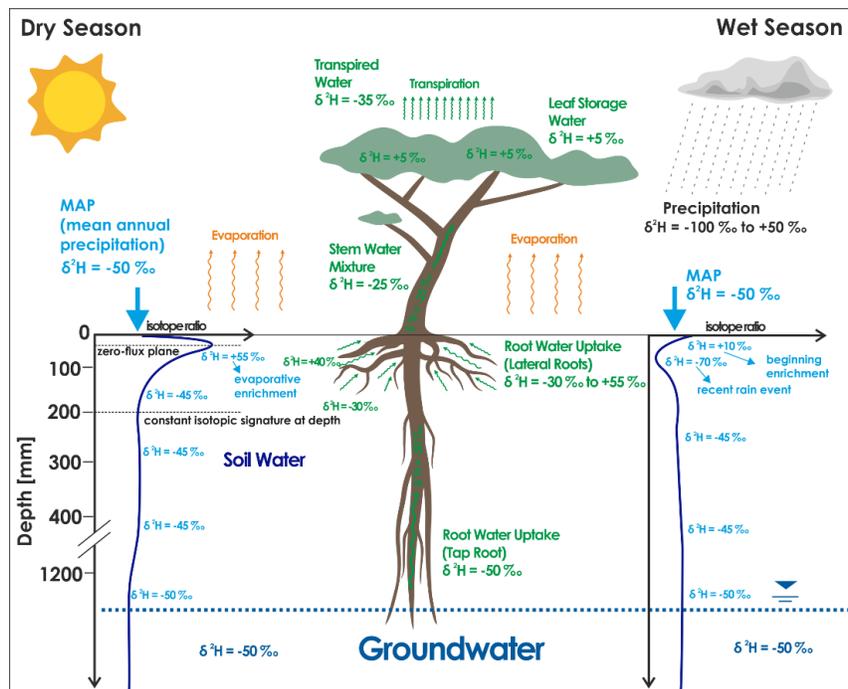


Figura 7. Flujos de agua con las firmas isotópicas. Fuente: Beyer 2018²

3. PRINCIPALES RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Al realizar la partición de los flujos mediante el modelo isotópico fundamentado en un balance de masa, se encontró que en Costa Rica el flujo de agua verde (transpiración) representa la mayor pérdida de vapor de agua por las coberturas vegetales, siendo este un 85%, y el otro 15% corresponde al flujo de agua azul (evaporación). Además, la zona seca de Costa Rica presenta los rangos con valores más bajos de transpiración, esto debido a que los bosques tienen una época en el año en que pierden sus hojas, y por lo tanto la transpiración es menor. Así mismo, la zona costera del Caribe presenta los valores más altos de transpiración con respecto a la zona costera del Pacífico. También se encontró una pérdida en el balance hídrico del 38% por transpiración, 10% de intercepción y el 7% por evaporación.

Para la partición de los flujos para la cuenca del río San Carlos en escala mensual, el flujo de agua verde en la cuenca representa el 76% de vapor de agua en la evapotranspiración, y el 24% para el flujo azul, dentro del área de la cuenca existe un patrón de transpiración durante los meses del año, y está delimitado por las dos épocas que existen en Costa Rica, es decir, en los meses que inicia la época de lluvia la transpiración disminuye, y, en los meses de la época seca tiende a aumentar, siendo marzo el mes con mayor promedio de transpiración con 129 mm. De igual forma, se registró una pérdida de agua para la cuenca se ve determinada por la transpiración siendo esta de 17.90%, 5.13% para la evaporación y 5.49% para intercepción, con estos hallazgos podemos determinar el nivel de importancia que tiene el proceso de la transpiración en el uso del agua en el ciclo hidrológico.

² <https://isodrones.d4e/>

La aplicación del modelo isotópico en escalas de tiempo más cortas como los meses brinda un panorama más claro del movimiento de los flujos, se puede observar con mayor claridad las variables climáticas que varían en los meses y generan un cambio en los flujos de agua del ciclo hidrológico.

La hidrología isotópica utiliza los isótopos estables de agua: deuterio y oxígeno 18 ($\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$) como trazadores naturales para obtener información de las cuencas como: cuantificación de los flujos de agua (transpiración y evaporación), conexión entre agua, suelo, planta y atmósfera, recarga de los acuíferos, identificación de la conexión entre las aguas subterráneas, generación de escorrentía y erosión del suelo, disponibilidad y calidad de agua, y para rastrear el origen de la contaminación del agua. De igual forma, permite la proyección del recurso hídrico frente a escenarios de variabilidad climática, mediante la incorporación de patrones climáticos locales en sus procesos.

La hidrología isotópica es una herramienta útil y viable en la gestión integrada del recurso hídrico en cuencas hidrográficas debido a que permite cuantificar los flujos de agua que ingresan al sistema, la tasa de transpiración en especies forestales y descifrar la interrelación entre la profundidad de raíces y el acceso al agua, en pro de identificar especies forestales con mayor potencial de resiliencia ante estrés hídrico. Esto puede facilitar el diseño y planificación territorial que consideren procesos de reforestación, restauración ecológica y establecimiento de sistemas agroforestales orientados a lograr una mayor eficiencia hídrica.

4. LITERATURA CITADA

- Aeschbach-Hertig, W. 2012. Introduction to isotopes in hydrology. *Physics of Aquatic Systems*. II: 1-38. (en línea). Consultado el 20 agosto. 2018. Disponible en: http://www.iup.uni-heidelberg.de/institut/studium/lehre/AquaPhys/docMVEEnv3_13/AqSysSkript_part2_chap1.pdf
- Álvarez, A; Morábito, JA; Schilardi, C. 2016. Huellas hídricas verde y azul del cultivo de maíz (*Zea mays*) en provincias del centro y noreste argentino. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias* 48(1):161-177
- Amador García, A; Martínez Ruíz, Y; Mendoza, ME. 2016. Estimación del balance hídrico espacialmente distribuido considerando escenarios de cambio climático en cuencas costeras no instrumentadas del golfo de México (en línea). Consultado el 19 de agosto. 2018. Disponible en <https://www.researchgate.net/publication/309590123>
- Archana, S; Deodhar, Md; Ansari, A; Sharma, S; Nobel Jacob, U; Kumar, S; Singh, G. 2014. Isotope Techniques for Water Resources Management. *Barc Newsletter* (337):29-35.
- Arellano Monterrosas, JL; Ruiz Meza, LE. 2018. Evaluación y tendencias de los servicios ecosistémicos hidrológicos de la cuenca del río Zanatenco, Chiapas. DOI: 10.13140/RG.2.2.31361.35680 (en línea). Consultado el 28 de agosto. 2018. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/326658402>
- Biro, Y; Marc, P. 2011. Water for forests and people in the mediterranean region. s.l., s.e. 3-4 p. (en línea). Consultado 5 de sept. 2018. Disponible en: http://www.efimed.efi.int/files/attachments/efimed/publications/efi_what_science_can_tell_us_1_2_011_en.pdf

- Blanco, JA. 2017. Bosques, suelo y agua: explorando sus interacciones. (en línea). *Ecosistemas* 26(2):1-9. Disponible en <https://www.revistaecosistemas.net/index.php/ecosistemas/article/view/1476>
- Botter, G; Bertuzzo, E; Rinaldo, A. 2010. Transport in the hydrologic response: Travel time distributions, soil moisture dynamics, and the old water paradox. *Water Resources Research* 46(3): s.p.
- Brauman, KA. 2015. Hydrologic ecosystem services: linking ecohydrologic processes to human well-being in water research and watershed management. (en línea). *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water* 2(4):345-358. Consultado el 7 de sept. 2018 Disponible en <http://doi.wiley.com/10.1002/wat2.1081>
- Brooks, Paul D., Chorover, Jon, Fan, Ying, Godsey, Sarah E., Maxwell, Reed M., McNamara, James P., Tague, C. 2015. Hydrological partitioning in the critical zone: Recent advances and opportunities for developing transferable understanding of water cycle dynamics. *Water Resources Research* 51:6973-6987.
- Bruijnzeel, LA. 1990. Hydrology of Most Tropical Forests and Effects of Conversion: A State of Knowledge Review (en línea). (November):3-5. Disponible en http://www.researchgate.net/publication/44337482_Hydrology_of_Most_Tropical_Forests_and_Effects_of_Conversion_A_State_of_Knowledge_Review
- Camarero, L; Catalan, J; Felip, M; Garcia-Orellena, J; Masqué, P; Palacín, C; Roca-Martí, M; Sala M. 2015. Uso de isótopos estables y radiactivos en seguimiento e investigaciones a largo plazo (LTER) de los ecosistemas acuáticos de los parques nacionales: Resultados del proyecto isótopos. (en línea). Consultado 5 de sept. 2018. Disponible en: https://www.mapama.gob.es/es/red-parques-nacionales/programa-investigacion/13-usodeisotoposestables267-285_tcm30-445441.pdf
- Cernuda, LA; Barbour, MM; Arndt, SK; Cheesman, AW; English, NB; Feild, TS; Helliker, BR; Holloway-Phillips, MM; Holtum, JAM; Kahmen, A; Mcinerney, FA; Munksgaard, NC; Simonin, KA; Song, X; Stuart-Williams, H; West, JB; Farquhar, GD. 2016. Stable isotopes in leaf water of terrestrial plants. s.l., Blackwell Publishing Ltd. 1087-1102 p.
- Cifuentes, JL; Cervetto, M; López, L; Fuentes, F; Feuker, P. 2015. Análisis preliminar de Isótopos Estables en aguas subterráneas, superficiales y lluvia de la Pampa del Tamarugal. (March 2016):1-5.
- Clothier, B. 2010. Green, blue and grey waters: Minimising the footprint using soil physics. 19th World Congress of Soil Science, Soil Solutions for a Changing World (August):1-6.
- Congjian, S; Yaning, C; Weihong, L; Xingong, L; Yuhui, Y. 2016. Isotopic time series partitioning of streamflow components under regional climate change in the Urumqi River, northwest China. *Hydrological Sciences Journal* 61(8):1443-1459.
- Delgado, RC; Souza, LP; Pereira MG; Torres De Almeida, C; De Ávila Rodríguez. 2017. Orbital and surface evapotranspiration compared to fao-56 standard in state of acre. ISSN 1808-3765 *Irriga, Botucatu*. Vol. 22. n. 3. 547-559p
- Đukić, V; Mihailović, V. 2012. Critical analysis of the contemporary methods for estimating reference evapotranspiration. (en línea). *Glasnik Sumarskog fakulteta* (106):57-70. Disponible en <http://www.doiserbia.nb.rs/Article.aspx?ID=0353-45371206057D>
- Easton, Z; Bock, E. 2015. *Hydrology Basics and the Hydrologic Cycle*.: 9.

- Enguita, G. 2016 Análisis histórico del balance de agua azul y agua verde en los montes del T. M. de La Zoma, afectados por el incendio del año 2009. s.p.
- Falkenmark, M. 2003. Freshwater as shared between society and ecosystems: From divided approaches to integrated challenges. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 358(1440):2037-2049.
- Falkenmark, M. 2009. Water for a starving world Malin Falkenmark SIWI and Stockholm Resilience Center. : s.p.
- Ferjana, T; Brenčič, M; Vreča, P. 2013. Changes in isotopic composition of bottled natural waters due to different storage conditions. IAEA (International Atomic Energy Agency). *Isotopes in Hydrology, Marine Ecosystems and Climate Change Studies Volume 2*. Austria. 35-42pag.
- Ferretti, DF; Pendall, E; Morgan, JA; Nelson, JA; LeCain, D; Mosier AR. 2003. Partitioning evapotranspiration fluxes from a Colorado grassland using stable isotopes: Seasonal variations and ecosystem implications of elevated atmospheric CO₂. *Plant and Soil* 254: 291–303, 2003. (en línea). Consultado el 5 de sept. 2018. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/43262487>
- Ferronsky, VI; Polyakov, VA. 2012. *Isotopes of the Earth's Hydrosphere* (en línea). s.l., s.e. s.p. Disponible en <http://link.springer.com/10.1007/978-94-007-2856-1>
- Froehlich, K; Rozanski, K. 1998. *Isotope hydrology: Applied discipline in Earth sciences Hydrologie isotopique: une discipline des sciences de la Terre*. (January): s.p.
- Gat, J. R., Mook, W. G., & Meijer, AJ. 2001. *Environmental isotopes in the hydrological cycle, principles and applications. Volume II: Atmospheric water*. (en línea). IHP-V, Technical Document 2(39):1-113. Disponible en http://www.hydrology.nl/images/docs/ihp/Mook_II.pdf
- Gat, JR. 1996. *Oxygen and Hydrogen Isotopes in the Hydrologic Cycle*. (en línea). :1-38. Disponible en <papers2://publication/uuid/70D154E9-6CEC-4010-9938-7E0AD2E25A2D>
- Gat, JR; Gonfiantini, R. 1981. *Stable isotope hydrology*. s.l., s.e. 356 p.
- Gat, JR; Mook, WG; Meijer, a. J. 2001. *Environmental isotopes in the hydrological cycle Volume II Atmospheric water*. (en línea). IHP-V, Technical Document 2(39):1-113. Disponible en http://www.hydrology.nl/images/docs/ihp/Mook_II.pdf
- Geyh, M. 2000. *Groundwater Saturated and unsaturated zone*. (en línea). *Environmental isotopes in the hydrological cycle* 4(39):1-291. Disponible en http://www.hydrology.nl/images/docs/ihp/Mook_VI.pdf
- Holko, L; Kostka, Z; Šanda, M. 2011. Assessment of frequency and areal extent of overland flow generation in a forested mountain catchment. *Soil and Water Research* 6(1):43-53.
- IAEA (International Atomic Energy Agency). 1984. *Effect of Climate and Vegetation on Oxygen-18 and Deuterium Profiles in Soils: Isotope hydrology, 1983: proceedings of an International Symposium on Isotope Hydrology in Water Resources Development: 105-123* (en línea). Consultado 20 agost. 2018. Disponible en https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:15067096
- IAEA (International Atomic Energy Agency). 1970. *Silicon-32 hydrology*. (en línea). *Isotopes in Hydrology* 1970: 847-863. Consultado 15 de agost. 2018. Disponible en http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/45/025/45025950.pdf

- IAEA (International Atomic Energy Agency). 2004. Isotope Hydrology and Integrated Water Resources Management. International Symposium held in Vienna, 19-23 may 2003 by IAEA and IAH in cooperation with the IAHS (May):19-23
- IMTA (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua). 2009. Laboratorio de Hidrología Isotópica. (en línea). Consultado el 20 de mayo. 2018. Disponible en: http://www.atl.org.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=1371:laboratorio-de-hidrologia-isotopica&catid=133:aboratorio&Itemid=598
- Instituto de Hidrología de España y UNESCO (Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura). 1981. Métodos de Cálculo del balance hídrico. Guía internacional de investigación y métodos. (en línea). 191p. Consultado el 25 de agost. 2018 disponible en <http://unesdoc.unesco.org/images/0013/001377/137771so.pdf>
- Llamas Madurga, MR. 2005. Los colores del agua, el agua virtual y los conflictos hídricos (en línea). Madrid, España. Citado el 20 de agost. 2018. Disponible en <http://www.rac.es/ficheros/doc/00187.pdf>
- Malesu, M; Oduor, A; Odhiambo, O. 2007. Green Water Management Handbook. s.l., s.e. 219 p. (en línea). Consultado el 5 de sept. 2018. Disponible en: <http://www.worldagroforestry.org/downloads/Publications/PDFS/MN15680.pdf>
- Mook, WG. 2002. Ciclo hidrológico: Principios y Aplicaciones Prólogo de la edición castellana. (en línea). Consultado el 29 agost. 2018. Disponible en: <https://es.scribd.com/doc/73748243/Isotopos-Ambient-Ales-Del-Ciclo-Hidrologico>
- Oki, T; Kanae, S. 2006. Global hydrological cycles and world water resources. Science 313(5790):1068-1072.
- Ordoñez, JJ. 2011. Ciclo hidrológico (en línea). Lima, Perú. Consultado el 15 agost. 2018. Disponible en https://www.gwp.org/globalassets/global/gwpsam_files/publicaciones/varios/ciclo_hidrologico.pdf. p44
- Ordoñez, JJ. Ed. Novoa Goicoche, ZI. 2011. Balance Hídrico Superficial. Lima Perú. (en línea). Consultado el 20 de agost. 2018. Disponible en https://www.gwp.org/globalassets/global/gwpsam_files/publicaciones/varios/balance_hidrico.pdf
- Peralta vital, JL; Castillo, RG; Dapeña Dapeña, C; Valdez González, L; Olivera Acosta, J; Morejón Miranda, YM. 2015. Hidrología isotópica, herramienta nuclear para la gestión sostenible del recurso hídrico Isotopic hydrology, nuclear tool for sustainable management of water resources. (1):57-72.
- Pidwirny, M. (2006). Introduction to Surface Runoff. Fundamentals of Physical Geography, 2nd Edition (en línea). Consultado el 19 agost. 2018. Disponible en <http://www.physicalgeography.net/fundamentals/8n.html>
- Raya, J. 2003. Composición isotópica del vapor de agua atmosférico en el sureste de la península Ibérica. Tesis doctoral. Universidad de Granada. Granada, España. (en línea). Consultado 10 de agost. 2018. Disponible en: <https://hera.ugr.es/tesisugr/17322686.pdf>
- Reyes-García, C; Andrade, JL. 2007. Los isótopos estables de Hidrógeno y el Oxígeno en los estudios eco fisiológicos de plantas. Boletín de la Sociedad Botánica de México 80:19-28.
- Robinson, M; Coasandey, C. 2011. Water resources depend of vegetation cover end land use. Birot, Y; Marc, P. Water for forests and people in the mediterranean region. 59-63pag.

- Rodríguez Arévalo, J; Castaño Castaño, S; Díaz Teijeiro, MF; Marcos, LA; Vázquez Marroquín, M. 2007. Modelo de distribución espacial continua de d18O en la precipitación en la provincia de Burgos. *Desarrollo de la metodología y aplicación en hidrología.*: 79-82.
- Salmoral, G; Dumont, A; Aldaya, MM; Rodríguez-Casado, R; Garrido, A; Llamas, MR. 2011. Análisis de la huella hídrica extendida de la cuenca del Guadalquivir. s.l. s.e. 91 p. (en línea). Consultado 5 de sept. 2018. Disponible en: <http://www.huellahidrica.org/Reports/Salmoral-et-al-2011.pdf>
- Sánchez Cohen, I; Arriaga, GE; López Santos, A; Inzunza Ibarra, MA; Catalán Valencia, EA. 2013. Balance hídrico como fundamento para toma de decisiones en agricultura de temporal. (en línea). Consultado el 18 de agost. 2018. Disponible en <https://www.researchgate.net/publication/264237239>
- Sánchez-Murillo, R; Birkel, C. 2016. Groundwater recharge mechanisms inferred from isoscapes in a complex tropical mountainous region. *Geophysical Research Letters* 43(10):5060-5069
- Sánchez-Murillo, R; Esquivel-Hernández, G; Welsh, K; Brooks, ES; Boll, J; Alfaro-Solís, R; Valdés-González, J. 2013. Spatial and Temporal Variation of Stable Isotopes in Precipitation across Costa Rica: An Analysis of Historic GNIP Records. *Open Journal of Modern Hydrology* 3(October):226-240
- Šanda, M; Kulasová, A; Císlarová, M. 2009. Hydrological processes in the subsurface investigated by water isotopes and silica. *Soil and Water Research* 4(SPECIAL ISSUE 2):83-92.
- Sharp, KA. 2001. Water: Structure and Properties (en línea). *Encyclopedia of Life Sciences*. Consultado el 20 de agost. 2018. Disponible en <http://doi.wiley.com/10.1038/npg.els.0003116>
- Singh, BP. 2016. Original isotopic composition of water in precipitation by different methods. (en línea). *Applied Water Science* 7(6):3385-3390. Consultado 23 de agost. 2018. Disponible en: <http://link.springer.com/10.1007/s13201-016-0500-6>
- Soler, A; Otero, N; Rosell, M; Carrey, R; Domènech, C.sf. Isótopos de la molécula del agua. (en línea). Consultado 27 agost. 2018. Disponible en: http://www.ub.edu/minegeo/images/IL3/Tema2_Link2_Isótopos_agua.pdf
- Sutanto, SJ; Wenninger, J; Coenders-Gerrits, AMJ; Uhlenbrook, S. 2012. Partitioning of evaporation into transpiration, soil evaporation and interception: A comparison between isotope measurements and a HYDRUS-1D model. *Hydrology and Earth System Sciences* 16(8):2605-2616.
- Su, Y; Shao, W; Vlček, L; Langhammer, J. 2019. Ecohydrological Behaviour of Mountain Beech Forest: Quantification of Stomatal Conductance Using Sap Flow Measurements. (en línea). *Geosciences* 9(5):243. Disponible en <https://www.mdpi.com/2076-3263/9/5/243>
- Tarin, T; Yépez, EA; Garatuza-Payán, J; Watts, CJ; Rodríguez, JC; Vivoni, ER; Méndez-Barroso, LA. 2014. Partición de la evapotranspiración usando isótopos estables en estudios eco hidrológicos. *Tecnología y Ciencias del Agua* 5(3):97-114.
- UNESCO (Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura). 2006. Balance hídrico superficial de Perú a nivel multianual. Documentos Técnicos del PHI-LAC, N°1 (en línea). Consultado 18 de agosto. 2018. Disponible en <http://unesdoc.unesco.org/images/0022/002281/228136s.pdf>
- Universidad Rafael Landívar. 2015. Balance hidrológico de las subcuencas de la República de Guatemala. Instituto de Investigación y Proyección sobre Ambiente Natural y Sociedad. p81. (en

línea). Consultado el 23 agosto. 2018. Disponible en:
<https://www.url.edu.gt/publicacionesurl/FileCS.ashx?Id=40416>

- Valenzuela, L; Ramírez-Hernández, J; Palomares, RB. 2013. Composición isotópica del agua subterránea y su relación con la salinidad en el valle de San Luis río Colorado en sonora, México. *Información Tecnológica* 24(2):57-66.
- Vargas, J; De la Fuente, L; Arumí, J. 2012. Balance hídrico mensual de una cuenca Patagónica de Chile: Aplicación de un modelo parsimonioso. *Obras y Proyectos* 12:32-41.
- Vásquez, G. 2011. Los Bosques Plantados y la Huella Hídrica, la Respuesta Hidrológica y la Hidrosolidaridad. *Seventh inter-American Dialogue on Water Management (November 2011)*: s.p.
- Vigasín, AA. 2009. Molecular structure and chemical properties of atmospheric water. *Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS)*. (en línea). Consultado 25 de agosto. 2018. Disponible en:
<http://www.eolss.net/sample-chapters/c07/e2-03-02-02.pdf>
- West, AG; February, EC; Bowen, GJ. 2014. Spatial analysis of hydrogen and oxygen stable isotopes («isoscapes») in ground water and tap water across South Africa. (en línea). *Journal of Geochemical Exploration* 145(October):213-222. Disponible en <http://dx.doi.org/10.1016/j.gexplo.2014.06.009>
- Yeh, HF; Lee, CH; Hsu, KC. 2011. Oxygen and hydrogen isotopes for the characteristics of groundwater recharge: A case study from the Chih-Pen Creek basin, Taiwan. *Environmental Earth Sciences* 62(2):393-402.
- Zang, CF; Liu, J; Van Der Velde, M; Kraxner, F. 2012. Assessment of spatial and temporal patterns of green and blue water flows under natural conditions in inland river basins in Northwest China. *Hydrology and Earth System Sciences* 16(8):2859-2870.

CAPÍTULO II

Artículo 1. Cuantificación de los flujos de agua azul y verde mediante isótopos estables del agua en Costa Rica.

RESUMEN

La transpiración se considera a escala global como uno de los componentes de la evapotranspiración con mayor aporte de vapor de agua (flujo verde) a la atmósfera, proveniente de los ecosistemas forestales, sin embargo, su medición directa es complicada y los métodos utilizados para su cuantificación son globales y generan cierto grado de incertidumbre. De manera que, la utilización de isótopos como trazadores, es uno de los métodos más concretos para dar seguimiento a las diferentes fases de los flujos de agua. En este estudio se analizó la partición de los flujos de agua azul y verde para Costa Rica utilizando isótopos estables de agua (deuterio, $\delta^2\text{H}$ y oxígeno, $\delta^{18}\text{O}$) correspondientes a muestras de agua de precipitación, aguas superficiales y subterráneas distribuidas por todo el país. Para el balance hidrológico se utilizaron bases de datos de variables climáticas como: precipitación, intercepción de la lluvia, temperatura ($^{\circ}\text{K}$) y humedad relativa (HR). El modelo isotópico para la partición de flujos está fundamentado en un balance de masa que permite considerar cada uno de los componentes y flujos de agua mediante la composición isotópica teniendo como resultado la separación de la transpiración/Evapotranspiración (T/ET). El modelo isotópico aplicado se basa en Gibson *et al.* 2002, Tarin *et al.* 2014 y Jasechko *et al.* 2013. Los resultados obtenidos se visualizaron en mapas espaciales para todo el territorio costarricense. La transpiración anual de Costa Rica tiene valores desde los 717 hasta 1366 mm, con un promedio anual de 1086 mm. Las Zonas de Vida (ZV) según Holdridge con más transpiración son los Bosques Pluvial Montano Bajo Subtropical (BPMBS), Bosques pluvial montano bajo tropical (BPMBT) y los que tienen menor transpiración son los Bosques Muy Húmedo Montano Tropical (BMHMT) y el Bosque Muy Húmedo Premontano Tropical (BMHPT). Consecuentemente al separar la transpiración de la evaporación (E), se encontró que la T constituye entre 0.67 hasta 0.99 de dicho flujo (ET) y la E de 0.0044 hasta 0.328. Esto significa un aporte de la transpiración de $\pm 85\%$ de la ET, mientras que la evaporación ronda los $\pm 15\%$, con una desviación estándar de $\pm 8\%$. De igual forma, se realizó la partición la precipitación para conocer cuánto se pierde por transpiración y se encontró que hay una pérdida promedio del 38% y un adicional del 10% por intercepción de lluvia.

Palabras clave: Partición isotópica, transpiración, evaporación, evapotranspiración, balance de masa, zonas de vida, agua verde y azul

ABSTRACT

On a global scale, transpiration from forest ecosystems is the component of evapotranspiration with the highest contribution to water vapor (green flow) of the atmosphere. The direct measurement of transpiration is very complex and the commonly used methods for quantifying it are based on a global scale and therefore uncertain. Nevertheless, the use of isotopes as tracers is one of the most specific methods for monitoring the different phases of water flows. In this study, the partition of the blue and green water flows for Costa Rica was analyzed using water stable isotopes (deuterium, $\delta^2\text{H}$ and oxygen,

$\delta^{18}\text{O}$) from samples of precipitation, surface water and groundwater measured throughout the country. Additionally, data sets of climatic variables such as precipitation, rain interception, temperature ($^{\circ}\text{K}$) and relative humidity were available for performing a hydrological balance. An isotopic model for flow partitioning was applied here which is based on a mass balance that allows each of the water components and flows to be considered by isotopic composition resulting in separation of Transpiration/Evapotranspiration (T/ET). The applied isotopic model is based on Gibson *et al.* (2002), Tarin *et al.* (2014) and Jasechko *et al.* (2013). The results are presented as spatial maps for the whole country of Costa Rica. The annual transpiration values range from 717 to 1366 mm, with an annual average of 1086 mm. The total area of study was divided into Life Zones (ZV) according to Holdridge. The ZVs with the most transpiration is the Subtropical Low Montane Rainforests (BPMBS) and Tropical Low Montane Rainforests (BPMBT), whereas those with the least transpiration are the Very Humid Tropical Montane Rainforests (BMHMT) and the Very Humid Tropical Premontane Rainforest (BMHPT). Consequently, by separating transpiration (T) from evaporation (E), it was found that T constitutes between 0.67 to 0.99 of that flow (ET) and E from 0.0044 to 0.328. This means that transpiration contributes by $\pm 85\%$ of the ET, while evaporation around $\pm 15\%$, with a standard deviation of $\pm 7.96\%$. In the same way, the precipitation partition was performed to estimate the loss by transpiration, and it was found to be 38% and an additional loss of 10% by rain interception.

Key words: Isotopic partitioning, transpiration, evaporation, evapotranspiration, mass balance, life zones, green and blue water

1. INTRODUCCIÓN

La importancia de conocer los flujos de vapor del agua que recorren la atmósfera y su relación con los ecosistemas terrestres, dan apertura a realizar modelos que evalúen y cuantifiquen los componentes de la evapotranspiración (ET) a una escala local, regional y global (Quade *et al.* 2019). Para esto se han utilizado diversas técnicas que se basan en datos de análisis satelitales y modelado hidrológico (REF), mediciones en la superficie mediante sensores *in situ* (REF) y sistemas de la covarianza Eddy (REF) y con métodos isotópicos de todos los componentes permitiendo la separación de la ET (Wei *et al.* 2017). Al realizar la partición isotópica de los flujos de agua azul y verde, podremos conocer su aportación en el ciclo del agua, y de esta manera comprender mejor el funcionamiento de los ecosistemas terrestres, ya sea en escala local, regional y global (Paschalis *et al.* 2018). Además, la relación de estos componentes está completamente definida en los diferentes ecosistemas y se podría decir que es independiente de las características de la cobertura vegetal y climática (Wei *et al.* 2017).

Desde la aplicación de los métodos isotópicos se han realizado múltiples investigaciones en diversas condiciones ambientales y coberturas vegetales, por ejemplo, Yépez *et al.* (2005) realizó una investigación en pastizales semiáridos, utilizando datos isotópicos, en la cual particionó la evapotranspiración, y cuantificó la dinámica de los flujos de la transpiración y evaporación. De igual forma, Moran *et al.* (2009) realizó una partición de la ET en ecosistemas semiáridos con pastizales y matorrales, ambos aplicaron métodos diferentes, pero siempre con datos isotópicos, las dos investigaciones buscan respuesta sobre la relación que existe entre la transpiración y evaporación y como es la dinámica en condiciones diferentes. Asimismo, Moreira *et al.* (1997) en los bosques del Amazonas cuantificó el aporte de la transpiración, encontrando que esta tiene el mayor aporte con respecto a la evaporación. Es importante resaltar que las investigaciones anteriores son a nivel local, pero en la

actualidad ya existen estudios de la partición de la ET, a escala mundial. Por ejemplo, la investigación realizada por Jasechko *et al.* (2013) a escala global concluye que entre el 80 y 90% de la ET la aporta la transpiración. Asimismo, Su *et al.* (2019) encontraron resultados similares que están entre el 60 y 80%, los resultados de ambos estudios reflejan que el mayor aporte de vapor de agua a la atmósfera se debe a la transpirada por la cobertura vegetal.

Los diferentes métodos de extracción de valores isotópicos del suelo, agua, plantas y atmósfera permiten obtener esas firmas isotópicas que se diferencian entre los flujos de vapor de agua, considerando los diferentes estados del agua y sus cambios de fase, ya sea por su fraccionamiento cinético, equilibrio o enriquecimiento (Cappa *et al.* 2003 y Lazo y Mosquera 2011). Es así, como Kulmatiski *et al.* (2010) describe que una de las mejores formas de medir el uso de agua de las plantas en las distintas profundidades de suelo en perfil horizontal o vertical es utilizando técnicas de isótopos estables del agua para conocer la variación de las concentraciones isotópicas estables y poder determinar el uso, procedencia y circulación en el ciclo hidrológico.

Por otra parte, uno de los métodos con mayor relevancia y que fue utilizado para esta investigación, es el modelo isotópico fundamentado en un balance de masa que permite la separación T y E y conocer su aportación en la ET. Este balance de masa permite la separación de todos los componentes de la evapotranspiración con sus datos isotópicos (Jasechko *et al.* (2013). Los componentes de la evapotranspiración se ven relacionados con procesos naturales y en algunos casos con alteraciones provocadas por algunas actividades antropogénicas, como en el caso de las pérdidas de cobertura vegetal, concentraciones de CO₂ en la atmósfera, además de algunos cambios en patrones de precipitación y temperatura (Paschalis *et al.* 2018). Para el caso de Costa Rica, Hernández *et al.* (2019) describen que la variación estacional de la composición isotópica estable de la precipitación se ve afectada por el transporte de humedad y que esta se asocia a la zona de convergencia intertropical, durante la estación más húmeda, precipitaciones de transición y la estación más seca, esto lo consideran muy importante ya que los isótopos estables del agua son utilizados como trazadores de procesos de generación de precipitaciones y transporte en ecosistemas montañosos de los trópicos.

Otro aspecto importante a ser considerado dentro de los estudios de la hidrología isotópica es el enriquecimiento isotópico ya que según Cernusak *et al.* (2016) el enriquecimiento isotópico del agua tiene influencia en las diferentes firmas isotópicas, es decir, el agua que es transpirada por las plantas muestra un mayor enriquecimiento que el agua que se evapora, cuando la tasa de transpiración es alta el enriquecimiento isotópico disminuye, de igual forma, la longitud del trayecto en que el agua es transportada es otro de los aspectos que influye en la disminución del enriquecimiento isotópico, en otras palabras, la fuente de agua presenta firmas isotópicas pero estas cambian, puesto que existe menos enriquecimiento donde los isótopos se evaporan, esto es lo que permite conocer si el vapor de agua encontrado en la atmósfera proviene del proceso de transpiración o de la evaporación.

2.2 Proceso metodológico

Los datos isotópicos (deuterio y oxígeno-18) de agua de precipitación, agua superficial y subterránea, se recopilaron de puntos de muestreo distribuidos por todo el país según Sánchez Murillo y Birkel (2016). El análisis de las muestras se hizo en el laboratorio de hidrología isotópica de la Universidad Nacional de Costa Rica (UNA) utilizando un Picarro L2120-I, con analizadores actuales con precisión de 0,1‰ $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ y 0,5‰ $^2\text{H}/^1\text{H}$. Las muestras isotópicas puntuales fueron interpoladas espacialmente mediante el método de Interpolación con la Distancia Inversa Ponderada (siglas en inglés IDW) para obtener paisajes isotópicos (“isoscapes”) a un tamaño píxel de 100 m a escala nacional. Estos paisajes isotópicos en conjunto con el balance hidrológico nacional forman la base para el modelo isotópico de separación de flujos T/ET.

Para visualizar los flujos de agua azul y verde (transpiración y evaporación) se elaboraron mapas para todo el territorio de Costa Rica que se ejecutaron con herramientas de raster: calculadora raster, clasificación, reclasificación y el método de Interpolación con la Distancia Inversa Ponderada (IDW) de los sistemas de información geográfica, específicamente con QGIS 2.18.15.

2.2.1 Partición de T/ET

Para poder determinar el fraccionamiento de la transpiración (T) en la evapotranspiración (ET) se utilizó un modelo isotópico modificado de una combinación de métodos de los autores (Gibson *et al.* 2002), (Jasechko *et al.* 2013) y (Tarin *et al.* 2014). Este modelo isotópico está fundamentado en un balance de masa que permite la separación T y E y conocer su aportación en la ET. Este balance de masa permite la separación de todos los componentes de la evapotranspiración con sus datos isotópicos, es decir, obtenemos el aporte de la T en la ET.

A continuación, se describen los modelos y métodos que se utilizaron para obtener la partición isotópica de la T, para poder obtener la signatura isotópica que se evapora δ_E se aplicó el método de Gibson *et al.* (2002), el cual se refleja en la siguiente ecuación:

$$\delta_E = \frac{\alpha^* \delta_L - h \delta_A - \epsilon}{1 - h + 10^{-3} \epsilon_k} \quad (1)$$

Donde:

δ_E : Es la signatura isotópica ^{18}O que se evapora. α^* : Es el fraccionamiento de isótopos de equilibrio líquido-vapor, se calcula mediante ($\alpha^* = 1 + \epsilon^*$). δ_L : Es la signatura isotópica estable del agua (Para esta investigación se utilizó la composición isotópica del agua superficial); h : Es la humedad relativa del aire, esta se obtuvo de la página web de Global Weather Data (Datos Meteorológicos Globales)³, esta base de datos globales fue diseñada por el Centro Nacional para la Predicción Ambiental (NCEP, sus siglas en inglés) del Sistema de Pronóstico Climático (CFSR, sus siglas en inglés); δ_A : Es la signatura isotópica del vapor de agua

³ <https://globalweather.tamu.edu/>

atmosférica (Se utilizó la composición isotópica de la precipitación, asumiendo es similar que la atmosférica).

Para poder completar el método descrito anteriormente se desarrollaron las siguientes ecuaciones:

$$\varepsilon = \varepsilon^* + \varepsilon_k \quad (2)$$

Donde:

ε : Es el factor de separación isotópica total, el cual incluye el equilibrio ε^* y el componente cinético ε_k . Es importante mencionar que la separación de equilibrio se realizó mediante ecuaciones empíricas que Gibson *et al.* (2002) describen en su investigación, pero que las tomaron de Horita y Wesolowski (1994), quienes las evaluaron y experimentaron. A continuación, las ecuaciones:

$$\begin{aligned} \varepsilon^* \approx 10^3 \ln \alpha(^{18}\text{O}) = & -7.685 + 6.7123(10^3/T) \\ & -1.6664(10^6/T^2) \\ & +0.35041(10^9/T^3) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \varepsilon^* \approx 10^3 \ln \alpha(^2\text{H}) = & 1158.8(T^3/10^9) - 620.1(T^2/10^6) \\ & + 794.84(T/10^3) - 161.04 \\ & + 2.9992(10^9/T^3) \end{aligned} \quad (4)$$

Donde:

T : Es la temperatura expresada en grados kelvin (°K), que se necesita para tener condiciones de evaporación, los otros son valores constantes establecidos. De estas condiciones de humedad depende mucho el enriquecimiento del factor cinético de ε_k , y este se evaluó utilizando la ecuación propuesta por Gibson y colaboradores:

$$\varepsilon_k = C_K(1 - h) \quad (5)$$

Donde:

C_K : Es un valor constante y experimentado de 14.2‰ para el oxígeno. Sin embargo, Tarin *et al.* 2014, también describen que el factor cinético de fraccionamiento (ε_k) para el oxígeno puede ser utilizado como un valor constante de 16.4 ‰, cabe mencionar que para esta investigación se utilizaron los dos valores y existieron unos breves cambios de valores para el fraccionamiento de isótopos de equilibrio líquido-vapor (α^*).

2.2 Balance de masa de isótopos estables

El método de balance de masa que se aplicó para obtener un resultado de la pérdida de agua por la transpiración y separación de los flujos de agua verde y azul fue el implementado por Jasechko *et al.* (2013). Este balance de masa de isótopos estables permite considerar cada uno de los flujos de agua mediante la composición isotópica. Sin embargo, se requiere de la signatura isotópica que se evapora

(δ_E), para este caso utilizamos el modelo basado en factores de fraccionamiento líquido-vapor de Gibson *et al.* 2002 (ecuación 1).

A continuación, se presenta el modelo utilizado para la partición del flujo azul y verde para Costa Rica, este modelo se modificó del método de Jasechko *et al.* (2013).

$$T = \frac{P(\delta_P - \delta_E) - Q(\delta_Q - \delta_E) - I(\delta_I - \delta_E)}{\delta_T - \delta_E} \quad (6)$$

Donde:

T: es la transpiración, **P:** es la precipitación, **δ_P :** es la composición isotópica de la precipitación, **δ_E :** es la composición isotópica que se evapora, **Q:** es el caudal superficial, **δ_Q :** es la composición isotópica caudal superficial, **I:** es la intercepción de la precipitación, **δ_I :** es la composición isotópica de la intercepción de la precipitación, **δ_T :** es la composición isotópica de la humedad transpirada, para esta investigación se utilizó la composición isotópica del agua subterránea, ya que según algunos autores como Ferretti *et al.* (2003); Sutanto *et al.* (2012) el agua que pasa por el xilema de las plantas proveniente del suelo no es afectada por el fraccionamiento isotópico, por lo que tienden a ser similares los valores isotópicos del agua subterránea y del agua transpirada.

Los datos base del modelo (Raster de paisajes isotópicos de agua superficial, subterránea, precipitación y el balance hidrológico nacional) ya estaban disponibles al inicio de la investigación, pero los datos de intercepción de la precipitación se obtuvieron del sitio web Global Land Evaporation Amsterdam Model (siglas en inglés GLEAM)⁴, este modelo global permite la estimación de todos los componentes de la evapotranspiración, utilizando observaciones satelitales actuales de las variables climáticas y ambientales (Martens *et al.* 2017 y Miralles *et al.* 2011).

Al ejecutar el modelo y obtener los resultados de la transpiración se analizó lo siguiente:

- Pérdida de transpiración por zona de vida según Holdridge (1963 o 1967).
- Se realizó una prueba de medias no paramétrica en RSstudio, para determinar la significancia entre ZV, el método utilizado fue el de Wilcoxon (1947), más conocida como prueba de “Mann-Whitney”. Esta prueba nos indica que si tenemos como resultados valores altos en p-valor, entonces no se rechaza la hipótesis nula y que los datos provienen de la misma fuente, de igual forma, no existe diferencia significativa entre las medias comparadas (Guillen *et al.* 2012).
- Partición de T y E en ET.
 - La fracción del flujo de agua verde (T/TE), se obtuvo dividiendo el raster de la Transpiración (T) entre el raster de la Evapotranspiración (ET).
 - La fracción del flujo del agua azul (E/TE) se obtuvo dividiendo el raster de la Evaporación (E) entre el raster de la Evapotranspiración (ET).

⁴ <https://www.gleam.eu/>

- Pérdida de la precipitación por la transpiración (T/P).
 - Se contaba con el modelo total, entonces, se dividió la transpiración entre el raster del modelo, con este proceso se obtuvo la pérdida de precipitación anual por transpiración, este resultado fue representado en un mapa espacial en forma de fracción.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Transpiración en Costa Rica.

En esta investigación se calculó la tasa promedio anual de la transpiración para todo el territorio de Costa Rica, mediante la aplicación del modelo balance de masa de Jasechko *et al.* (2013), que utiliza signaturas isotópicas para todos sus componentes, los resultados obtenidos reflejan que la transpiración tiene valores que van desde 717 hasta 1366 mm, de acuerdo, a los rangos en que se clasificó la transpiración, se puede decir que, la zona costera del Mar Caribe de Costa Rica muestra una tasa de transpiración con valores más altos con respecto a la zona costera del Océano Pacífico, sin embargo, no se puede descartar que algunas partes del Océano Pacífico, tienen valores altos de transpiración. De igual forma, la zona seca de Costa Rica muestra tasas de transpiración con valores bajos, así, como en otras zonas del país, en general el país tiene un promedio de 1086 mm de transpiración anual, con una STDDEV de 170 mm (figura 9).

Por otra parte, Moore *et al.* (2017) utilizaron la técnica de medición de flujo de savia en 15 árboles de diferentes especies en el bosque tropical húmedo premontano de Costa Rica y encontraron que la transpiración es aproximadamente 511 mm en promedio anual, asimismo, citan que sus resultados obtenidos se encuentran dentro del rango descrito por Bruijnzeel y Veneklaas (1998) para los bosques tropicales nubosos (250 a 645 mm año). Consecuentemente, tenemos que Bruijnzeel *et al.* 2010 realizan un análisis de los bosques tropicales a nivel mundial y mencionan que las condiciones o características de estos bosques crean un gradiente en el cual la ET varía, por altitud (directamente responsable la temperatura), precipitación, radiación y humedad en el área foliar. Por otra parte, entre el 75 y 80% de la energía de los días con mayor radiación solar es utilizada para la transpiración en las selvas tropicales (Shuttleworth 1988a, citado por Bruijnzeel 1990)

Para Welsh *et al.* (2018) una forma de comprender los flujos o componentes del balance hidrológico en los bosques húmedos tropicales es la utilización del muestreo isotópico, ya que existen variaciones significativas en la precipitación y generan un desafío para la comprensión de los procesos que generan los flujos. De esta forma tenemos que la transpiración de los árboles dominantes es diferente a los del sotobosque, posiblemente se debe a la humedad prolongada de las hojas, por lo que se recomienda realizar mediciones escalares de la transpiración para estos tipos de bosques y no sobreestimar los valores del bosque muy pequeño con el dominante que tiene exposición directa con la energía solar (Moore *et al.* 2017)

Granier *et al.* (2000) y Su *et al.* (2019), describen que la transpiración es un componente de gran importancia en la contribución de la pérdida de agua, principalmente en regiones con vegetación o

cobertura boscosa muy densa, también, describen que depende mucho de las condiciones ambientales, meteorológicas, humedad del suelo, profundidad de los flujos de agua y si las raíces son capaces de adquirirla para transportarla hasta las hojas. En consecuencia, sería ideal realizar mediciones isotópicas de los flujos de agua en las dos épocas, lluviosa y seca, para realizar un análisis mensual de la partición de los flujos y ver en qué mes o meses la transpiración tiene sus valores más altos, de igual forma, realizar la comparación por tipos de cobertura de bosque y así identificar las especies que más transpiran.

Los métodos isotópicos utilizados para fraccionar la transpiración son de mucha utilidad ya que se puede encontrar esa diferencia climática o aspectos ambientales que pueden afectar o favorecer el proceso de la evapotranspiración, es decir, se puede estudiar el ciclo atmosférico del agua, conocer la procedencia y porcentaje de agua que está circulando en la atmósfera (Yamanaka y Sunakawa 2017). Esto es posible gracias a la firma isotópica que contiene cada flujo de agua, donde el agua transportada por las plantas tiene un mayor enriquecimiento con isótopos pesados y estos no sufren fraccionamiento durante el proceso de transpiración, caso contrario de lo que sucede en la evaporación del agua en el suelo y otros cuerpos de la superficie, sus isótopos son más ligeros, inclusive el mismo vapor de agua de la atmósfera contiene isótopos más ligeros que la evaporación (Yepez *et al.* 2003 y Williams *et al.* 2014 citado por Sun *et al.* 2014).

Jasechko *et al.* (2013), mencionan el rol importante de la transpiración en el balance hídrico de las cuencas, inclusive en los desiertos. Es importante realizar para Costa Rica este análisis de transpiración por cuencas para conocer ese equilibrio entre demanda y oferta del agua, conociendo que la mayor entrada de agua al balance hídrico es la precipitación, si la cobertura vegetal tiene un fuerte aporte a la T, esto significa que las cuencas con mayor cobertura pueden estar perdiendo cantidades de agua anual en el proceso de la transpiración, el cual influye en la parte de demanda hídrica para los pobladores.

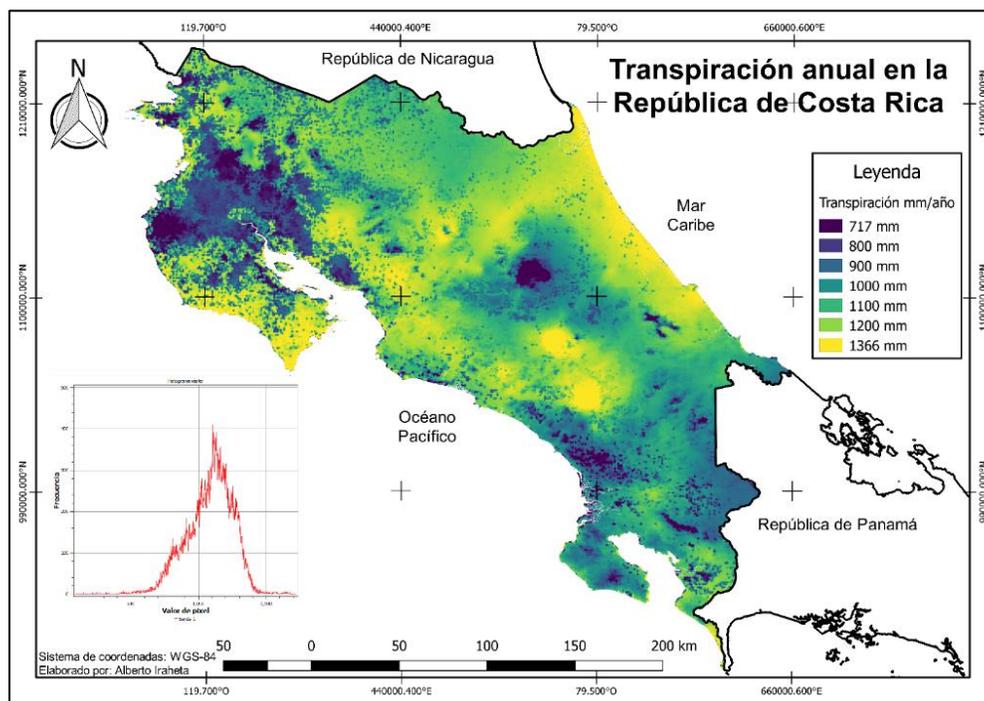


Figura 9. Promedio anual de la transpiración en Costa Rica.

3.2 Transpiración por Zona de Vida (ZV)

La figura 10 muestra la variación de la transpiración para cada una de las zonas de vida de Costa Rica, se puede observar que la distribución de los valores de la transpiración se atribuye a las condiciones climáticas de cada zona de vida, además algunos bigotes del box plot están bien extendidos porque dentro de la misma zona de vida existen valores extremos de transpiración. También encontramos que el Cuartil 1 (Q1) de la mayoría de las zonas de vida tiene el 25% de transpiración por debajo de los 1000 mm, de igual forma, el cuartil 3 (Q3) muestra que el 75% de los valores están por debajo de 1300 mm. En general las ZV transpiran en promedio anual aproximadamente 1043 mm, es decir, es un promedio ponderado de las tasas de transpiración por cada ZV.

Según los resultados de la prueba de Wilcoxon, todas las ZV muestran una media diferente, es decir, existe diferencia significativa entre cada una de ellas, se puede decir que esto se debe a las diferentes características geográficas y climáticas propias de cada ZV, es decir, presentan diferentes rangos de precipitación, altura y temperatura entre otras variables que utilizó Holdridge para hacer la clasificación.

Las zonas de vida son muy importantes en la clasificación de los ecosistemas ya que involucran una combinación de procesos, variables y factores climáticos para formar espacios geográficos con características específicas y respuestas eco fisiológicas de las plantas, por lo tanto, tiene una estrecha relación con procesos de evapotranspiración, temperatura, precipitación y altitud (Derguy *et al.* 2016). Costa Rica tiene una clasificación de 16 zonas de vida en las cuales se utilizaron datos de precipitación media anual, temperatura media anual y altitud. Además, Yue *et al.* (2001) indica que las zonas de vida brindan datos importantes con respecto a las condiciones de humedad del ecosistema, ya que las condiciones de su medio se deben a la relación entre la temperatura, humedad de la atmosfera, precipitación y el vapor de agua. Esto se relaciona con lo que menciona Sun *et al.* 2014, la partición de los flujos de agua azul y verde contribuye a comprender porque el intercambio de vapor de agua puede ser continuo en la relación isotópica de suelo-planta-atmósfera.

Podemos resaltar que las ZV denominadas Bosque Pluvial Montano Tropical (BPMT), Bosque Pluvial Montano Subtropical (BPMS), Bosque Pluvial Montano Tropical (BPMT) y Bosque Pluvial Montano Bajo Tropical (BPMBT), mantienen una media arriba de los 1100 mm de transpiración, de igual forma, sus valores mínimos se encuentran por arriba de los 1000 mm, solo la BPMS muestra valores mínimos de 633 mm. Los bosques pluviales montanos muestran valores altos de transpiración porque tienen características especiales como: precipitaciones que oscilan entre los 2200 y 4500 mm anuales, alta radiación solar, variaciones de temperatura y humedad relativa bien marcadas, suelos poco estables y la cobertura vegetal siempre es verde (Ministerio de Agricultura y Ganadería 2010). Los hallazgos de la esta investigación tienen relación con lo que dicen autores como Moreira *et al.* (1997), los ecosistemas forestales con coberturas densas y siempre verdes tienen mayores tasas de transpiración, además podemos añadir que tiene alto promedio de precipitación y según la partición que se realizó la T es la responsable de $\pm 38\%$ de la pérdida de la precipitación en Costa Rica.

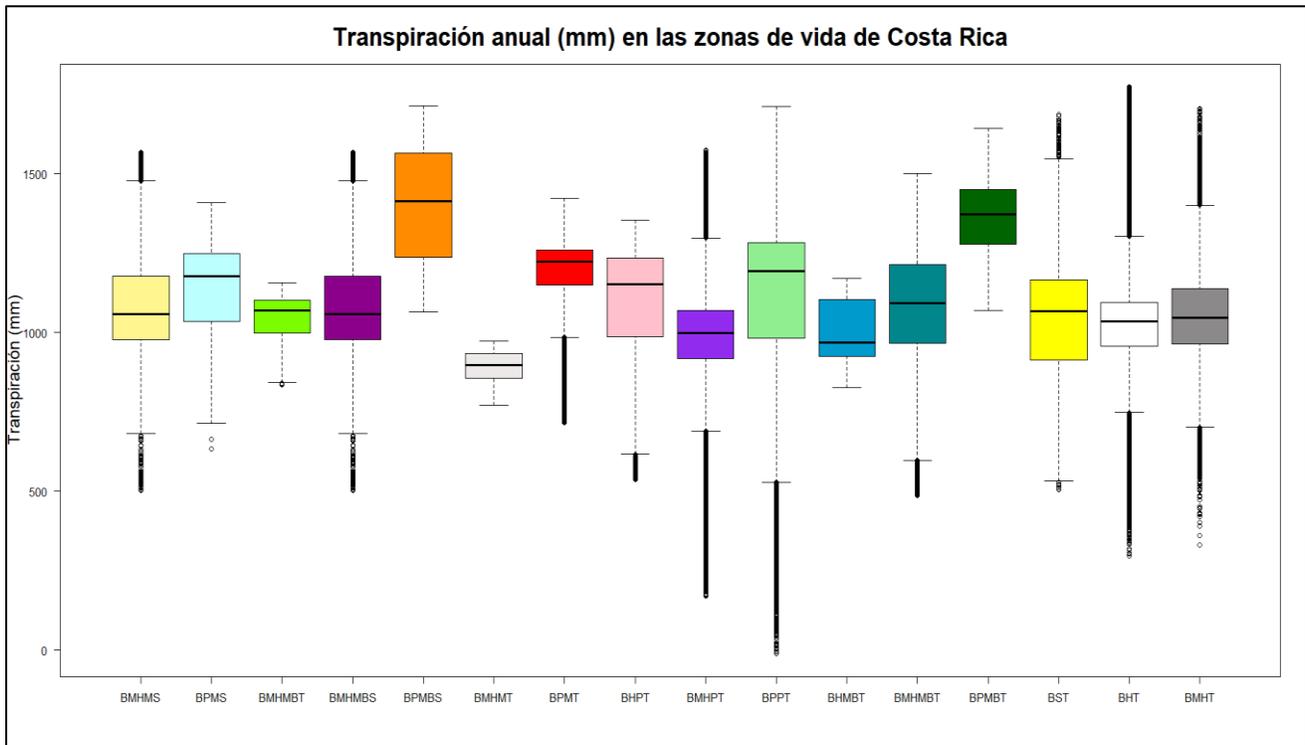


Figura 10. Distribución de la transpiración anual por zonas de vida de Holdridge.

Bosque Muy Húmedo Montano Subtropical (BMHMS), Bosque Húmedo Montano Bajo Subtropical (BHMBBS), Bosque Muy Húmedo Montano Tropical (BMHMT), Bosque Húmedo Premontano Tropical (BHPT), Bosque Húmedo Montano Bajo Tropical (BHMBT), Bosque Seco Tropical (BST), Bosque Pluvial Montano Subtropical (BPMS), Bosque Muy Húmedo Montano Bajo Subtropical (BMHMBS), Bosque Pluvial Montano Tropical (BPMT), Bosque Muy Húmedo Premontano Tropical (BMHPT), Bosque Muy Húmedo Montano Bajo Tropical (BMHMBT), Bosque Húmedo Tropical (BHT), , Bosque Pluvial Montano Bajo Subtropical (BPMS), Bosque Pluvial Premontano Tropical (BPPT), Bosque Pluvial Montano Bajo Tropical (BPMBT), Bosque Muy Húmedo Tropical (BMHT).

Según explica Aparecido *et al.* (2014) los bosques secos y húmedos de Costa Rica presentan una ligera variación de transpiración en el cambio de épocas, es de decir, de época seca a época lluviosa, también encontró que la humedad en las hojas reduce la transpiración, además, señala que la evapotranspiración influye de manera significativa a través de la relación tierra-atmósfera en la precipitación de los bosques tropicales, sobre todo donde esta tiene un mayor reciclaje, como consecuencia los ecosistemas tropicales pueden tener alteración en el reciclaje del ciclo del agua. Por otra parte, O'Brien *et al.* (2004) mencionan que las altas precipitaciones en los bosques tropicales son sinónimo de humedad en las hojas de los árboles, esto inhibe la transferencia de gases que entran y salen por las estomas, por lo que algunas variables (humedad de la hoja, humedad relativa, la irradiación, la temperatura y la velocidad del viento) y factores ambientales se interrelacionan para lograr un efecto dentro del proceso de la transpiración, por ejemplo, Aparecido *et al.* (2014) menciona que la humedad en las hojas proporciona efecto negativo en la transpiración y la radiación solar con la temperatura un efecto positivo (Bruijnzeel *et al.* 2010).

3.3 Fracción de los flujos de agua verde y azul

La partición de los flujos de agua verde y azul para Costa Rica muestra que el flujo verde, es decir, la transpiración es la que tiene mayor aporte a la evapotranspiración. Sus valores de fraccionamiento van desde 0.67 hasta 0.99. Como se refleja en la figura 11, el mayor valor de fracción se observa en el color amarillo, el cual se encuentra en una parte central y una pequeña área del Mar Caribe de Costa Rica; sin embargo, casi todo el territorio muestra una fracción entre 0.83 a 0.91. Es importante mencionar que Costa Rica es un país donde se practica mucho la protección y conservación del bosque, incluyendo los sistemas sostenibles de manejo de la zona de ganadería.

Wang *et al.* (2015) realizó una investigación en la que fraccionó T/ET un ecosistema de pastizales de clima templado utilizando un modelo de trazadores de isótopos estables de agua en el suelo, planta y atmósfera, y, encontró que la fracción de la T fue de 0.02 a 0.99, con promedio de 0.75, y una desviación estándar de 0.24, cabe destacar que en área de estudio las hierbas estaban en etapa de crecimiento. Esto nos indica que hay que tener consideraciones sobre la vegetación que se encuentra en crecimiento, ya que posiblemente represente valores más altos de transpiración, por lo que sería ideal para Costa Rica comparar la tasa de transpiración de un bosque maduro con uno joven en crecimiento.

Se puede decir que Costa Rica busca convertirse en un país verde, y esto se refleja en los datos de transpiración en la mayor parte del territorio, ya que, según los resultados y estudios realizados, la cobertura vegetal es la responsable de aportar la mayor cantidad de vapor de agua a la atmósfera (Yépez *et al.* 2005). El crecimiento de la vegetación está estrechamente relacionado con el equilibrio hídrico a través del proceso de la transpiración, y reitera que el enfoque de isótopos es útil para calcular cuantitativamente la relación entre ellos (Wang *et al.* 2015).

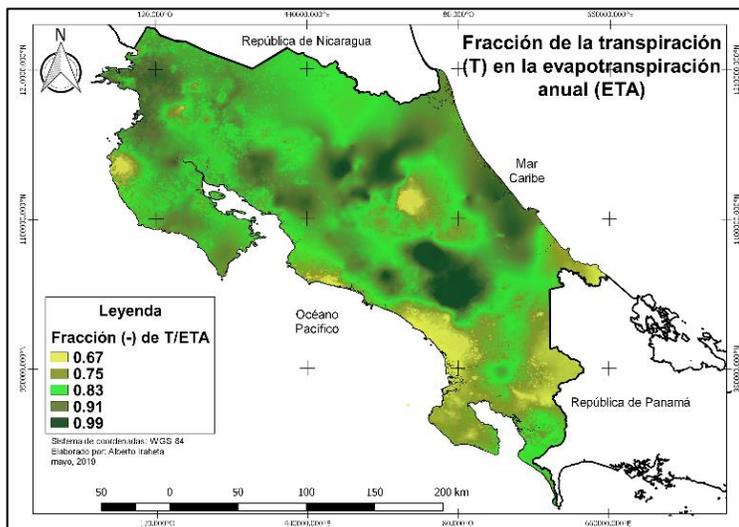


Figura 11. Fracción del flujo verde para Costa Rica

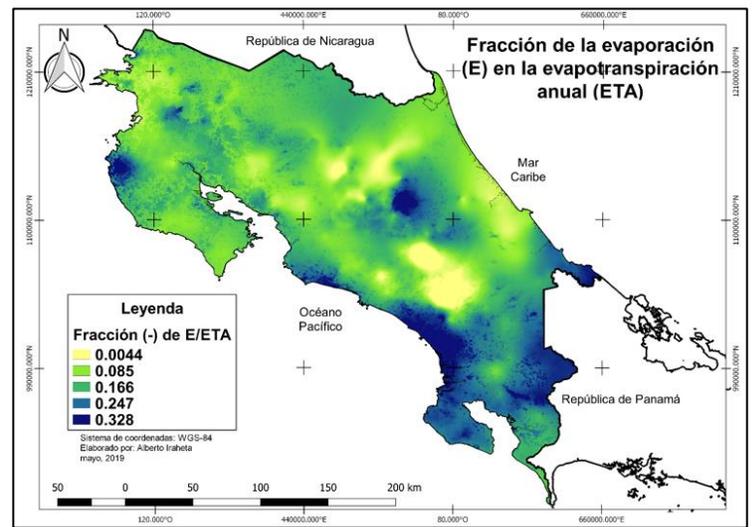


Figura 12. Fracción del flujo azul para Costa Rica

El flujo de agua azul (evaporación) para Costa Rica presentó un rango de valores bajos que van desde los 0.0044 hasta 0.328; puede observarse en la figura 12, que los rangos con valores altos se encuentran en los sitios donde el flujo de agua verde tiene sus valores más bajos. Al realizar una comparación de la

figura 11 y 12 se podrá notar que los valores se complementan en su mayor parte, donde un flujo muestra valores altos el otro presenta valores bajos, alcanzando el 100% que es la ET.

La cuantificación de los flujos de agua cada vez más se vuelve indispensable para comprender el comportamiento dentro de las condiciones y propiedades climáticas, además, el equilibrio de la cobertura vegetal, de manera particular interviene en la evaporación de las distintas superficies, ya sea de suelos desnudos, bajo el bosque o inclusive de la interceptación o escorrentía dependen de los factores climáticos locales y regionales y, en algunos casos globales, ya que estos vapores de humedad pueden verse afectados por el cambio climático (Paschalis *et al.* 2018).

Para Or *et al.* (2012) la evaporación es un componente importante de la evapotranspiración, ya que esta devuelve a la atmósfera $\pm 60\%$ de la precipitación, por lo tanto la evaporación es un factor hidrológico clave que utiliza aproximadamente el 25% de la energía solar, de esta manera, la cuantificación de este componente es fundamental para evaluar posibles cambios en el balance hídrico, además, hace mención de algo muy interesante, con respecto a la tasa de evaporación, esta no es proporcional al contenido de agua superficial. Por lo tanto, donde existe más lámina de agua superficial no siempre existirá mayor evaporación, y esto se puede visualizar en el fraccionamiento de la evaporación, el cual tiene valores bajos con respecto a la transpiración. Cabe mencionar que Costa Rica es un país con muchas fuentes de agua superficial.

El modelo que utilizó Jasechko *et al.* (2013) determinó que la transpiración a nivel global aportaba entre el 80 y 90% de la ET; el mismo modelo también se utilizó en esta investigación y se obtuvo como resultado que la T para Costa Rica aporta $\pm 85\%$ de la ET, mientras que la evaporación $\pm 15\%$, con una desviación estándar de $\pm 7.96\%$. De acuerdo, con Su *et al.* (2019) los estudios de la transpiración realizados a escala mundial representan entre el 60 y 80% de la evapotranspiración, esto significa que los resultados obtenidos para Costa Rica se encuentran dentro del rango global descrito por este autor. Además, se puede observar que la desviación estándar 7.96% es baja, lo que indica que la mayor cantidad de la transpiración se encuentra agrupada por la media.

Asimismo, Sun *et al.* (2014) en su investigación realizada con el método de partición isotópica en un ecosistema forestal de la especie *Quercus variabilis* encontró que la transpiración inicia su aumento desde la mañana alcanzando valores máximos al medio día, que van desde 85.37% a 91.19%, además, recomiendan utilizar el método isotópico para particionar la ET en los ecosistemas forestales, pero tomando en cuenta la concentración del vapor de agua, ya que este juega un papel muy importante en este proceso de fraccionamiento isotópico. Otro aspecto importante para considerar en este tipo de investigaciones es que el flujo de vapor de agua proveniente de la evaporación tiene un fraccionamiento alto con respecto a la transpiración, en otras palabras, la composición isotópica de ambos procesos es diferente, la cual permite particionar los dos flujos dentro de un ecosistema cualquiera (Yépez *et al.* 2003).

Sin embargo, existen otros modelos de partición de la transpiración y uno de ellos es el utilizado por Wei *et al.* (2017) el cual combina las estimaciones globales de la ET y lo relaciona con un índice de área foliar (siglas en inglés LAI) y lo hace para diferentes coberturas vegetales, sin embargo, el resultado

sigue siendo que la transpiración representa la mayor parte de la evapotranspiración, con un 57.2% y desviación estándar de $\pm 6,8\%$, a nivel global. Asimismo, la mayoría de las investigaciones realizadas para particionar ET, atribuyen que la transpiración tiene mayor proporción y que esta es mayor en los bosques húmedos tropicales que en ecosistemas como los desiertos y otros (Schlesinger y Jasechko 2014). De igual forma, esta investigación realizada en Costa Rica, mediante método isotópico, afirma que la transpiración es la que mayor vapor de agua aporta a la evapotranspiración, además, sus ecosistemas son bosques tropicales húmedos y secos, es decir existe una variación de la temperatura, radiación y precipitación, lo cual genera condiciones con diferencia de tasas de transpiración, así como se muestra en el mapa de los resultados de la transpiración anual para todo el país.

3.4 Fracción de la transpiración en la precipitación

La transpiración es un proceso muy importante en el movimiento del agua tanto en la atmósfera como en el suelo, en la figura 13 se puede observar que existe un fraccionamiento de la precipitación en cuanto a la pérdida por transpiración. El fraccionamiento va desde 0.19 hasta 0.69, estos valores corresponden a promedios anuales de precipitación. Se puede observar que los valores más altos de pérdida de precipitación por el proceso de transpiración se encuentran en la región Pacífico Norte de Costa Rica. En esta región predomina la zona de vida Bosque Seco Tropical (BST), la estación seca inicia desde el mes de noviembre hasta el mes de mayo. Los valores más altos de fraccionamiento de la precipitación por la transpiración se encuentran en la región seca. Según Zongxing *et al.* (2016) existen tres componentes importantes en la generación de precipitación, la evaporación, la transpiración y la advección, estos componentes son recíprocamente relacionados por la elevación, siendo la advección la responsable de la mayor contribución a la precipitación, pero también señala que si existe una vegetación bien conservada la contribución de la transpiración será relativamente importante.

Por otra parte, las variaciones espaciales del fraccionamiento isotópico dependen de la correlación con las variables climáticas por ejemplo la temperatura, cantidad de precipitación y el historial que presenta la masa de aire (Conroy *et al.* 2013; Zhang y Wang 2018), esta correlación de las variables las explica Sánchez-Murillo y Birkel (2016) mostrando que existe un gradiente de humedad que entra por el Mar Caribe de Costa Rica llevándolo hasta las tierras bajas, y por las condiciones orográficas y la abundancia de la vegetación, tienen como resultados precipitaciones isotópicamente enriquecidas, en comparación con las del Pacífico. Esto explica un poco del motivo por el cual en las zonas secas se encuentran valores más altos de fraccionamiento de la precipitación, de igual forma, tienen relación con los resultados encontrados en la pérdida de precipitación por transpiración, ya que el BST, es uno de los bosques que presenta un promedio alto.

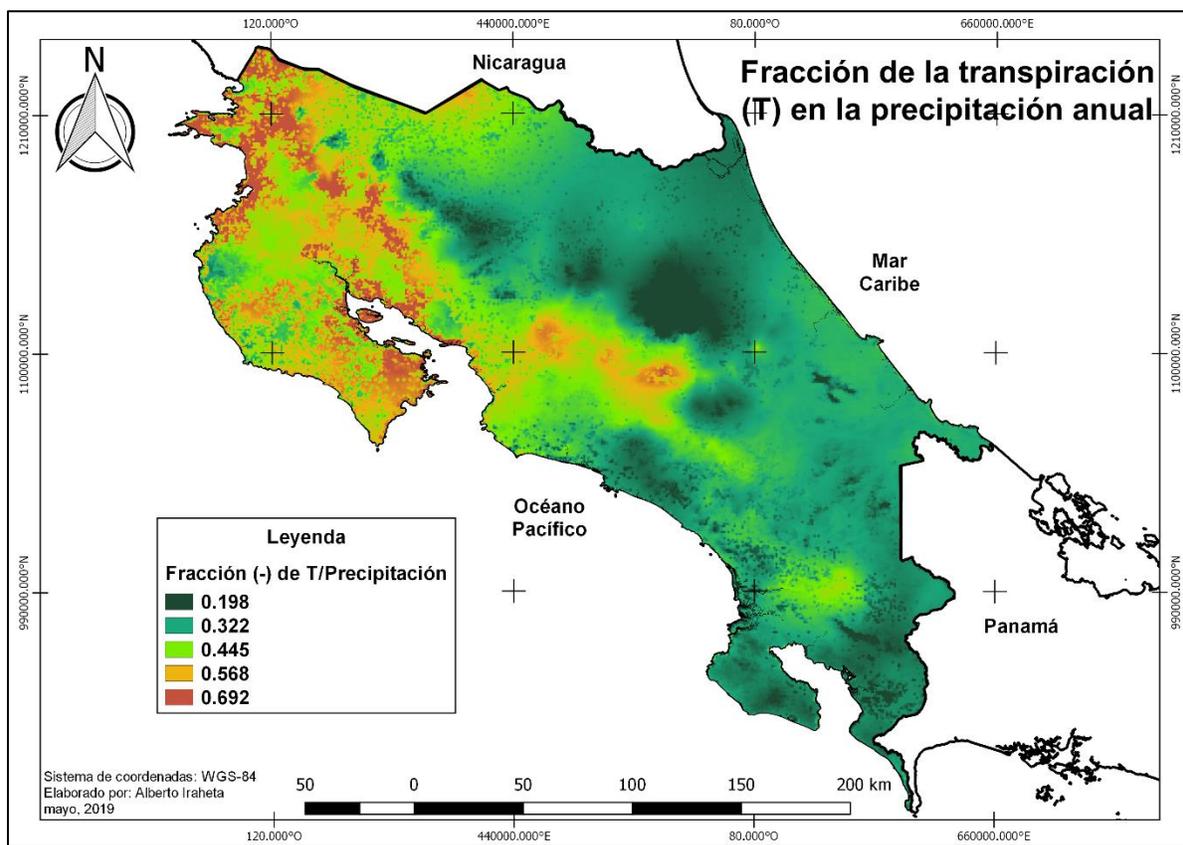


Figura 13. Fracción de la transpiración en la precipitación anual de Costa Rica.

3.5 Pérdida de precipitación por transpiración en las ZV.

La variación de la pérdida de la precipitación por el proceso de la T en Costa Rica se realizó en una distribución espacial por ZV (figura 14), de esta manera, se encontró que el Bosque Seco Tropical (BST), Bosque Muy Húmedo Montano Bajo Subtropical (BMHMBS), Bosque Húmedo Premontano Tropical (BHPT) y el Bosque Húmedo Montano Bajo Tropical (BHMBT) son los que muestran un promedio mayor. Por otra parte, tenemos que las ZV con menor promedio de pérdida de precipitación son Bosque Pluvial Premontano Tropical (BPPT), Bosque Muy Húmedo Tropical (BMHT) y el Bosque Pluvial Montano Bajo Subtropical (BPMBS). El BST se encuentra dentro de las ZV que pierden más precipitación, mencionando que Holdridge lo clasifica como una de las ZV que tiene aproximadamente entre 1000 a 2000 mm de precipitación al año y se encuentra geográficamente distribuido desde 0 a 1000 msnm, y su temperatura media anual es más de 24 °C, de acuerdo, con los resultados obtenidos el 30 y 58% del promedio anual lo pierde en el proceso de transpiración.

Moore y Aparecido (2018) midieron la transpiración en diferentes estratos del bosque tropical húmedo de Costa Rica durante un periodo de cinco años, encontraron que solo el 10% de las precipitaciones se transpira por esta densa masa boscosa de los trópicos de Costa Rica, y que esto se debe a la baja radiación que en ellos permanece, además la transpiración disminuía con la humedad presente en las hojas, otro aspecto importante que resaltaron en estos bosques es que el suelo siempre mantiene la

humedad por encima de los niveles de déficit, y que en el mes más seco registrado para estos bosques la transpiración aumenta. Para que la transpiración pueda suceder las hojas de los árboles deben tener una humedad por debajo del 80% (Moore *et al.* 2017).

Por otra parte, Aparecido *et al.* (2016) encontró que la humedad de la hoja disminuye la transpiración en un 28%, aparte de los efectos causados por la radiación solar y del déficit de la presión de vapor, de igual forma, menciona que eventos de precipitación pueden inferir de manera directa en la transpiración, al comparar la transpiración en dos diferentes copas de árboles unos con exposición directa y otros bajo sombra (árboles dominantes, historia media y árboles suprimidos en la sombra), pero los árboles se encontraban en dos condiciones del dosel húmedo y seco, además la zona tiene aproximadamente 4200 mm de precipitación anuales, encontró que los árboles dominantes contribuyeron con un 76% de transpiración mientras que los árboles de historia media y suprimidos con un 18 y 5%.

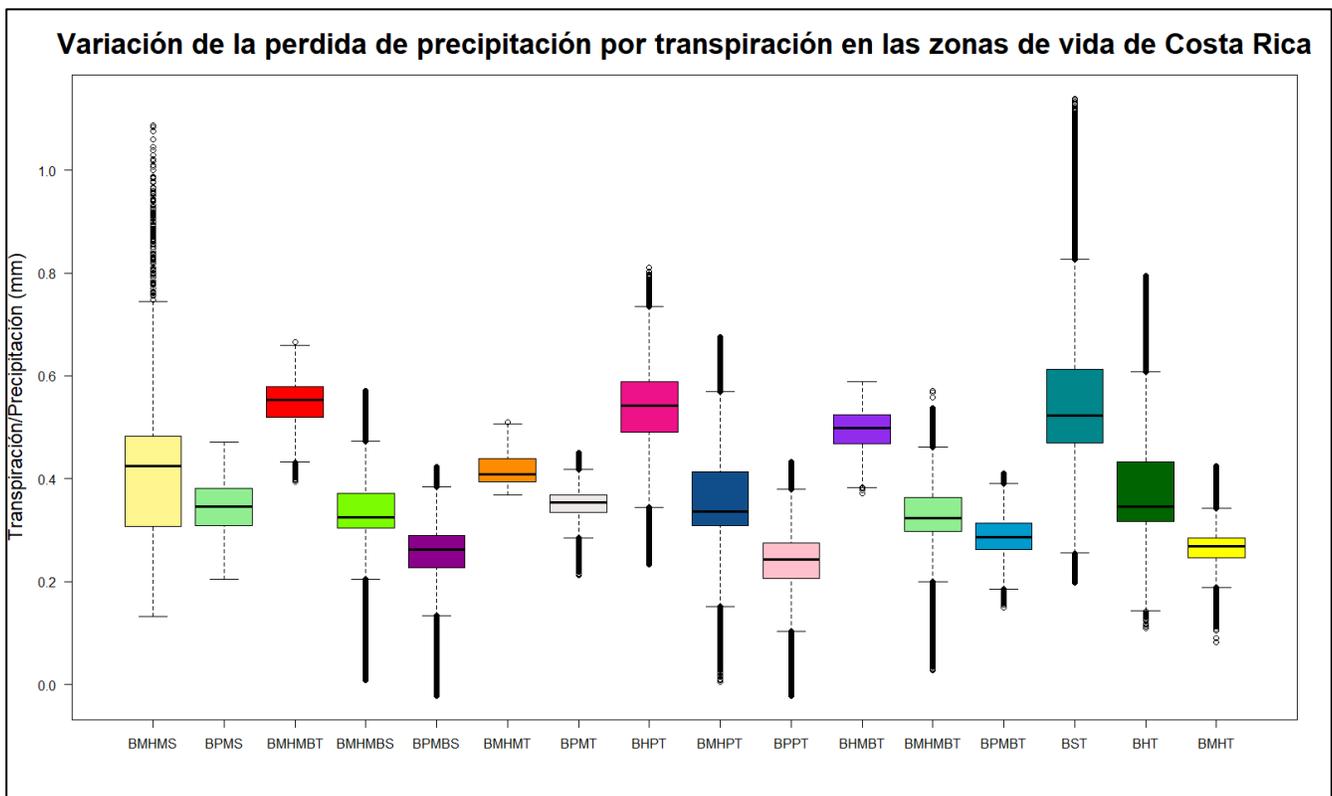


Figura 14. Pérdida de precipitación por transpiración en las zonas de vida de Costa Rica.

La mayoría de los bosques tropicales se encuentran intervenidos por actividades agropecuarias, por tal razón Giambelluca *et al.* (2003) realizaron una investigación en un parche de bosque tropical rodeado por cultivos, en el cual cuantificaron la transpiración, encontraron que la transpiración en la época seca fue de aproximadamente el 39 y 43% tanto al interior del bosque como en el borde, pero esta aumentó cuando inicio la temporada de lluvia alcanzando un porcentaje entre el 60 y 68%, además, mencionan que las condiciones del área deforestada favorece a los árboles del borde del bosque, ya que genera la transferencia directa de una masa de calor, consecuentemente, esto fue notable en las tasas de

transpiración conforme los árboles interiorizaban en el bosque presentaron una disminución significativa del -0.0135 mm por día.

De acuerdo, a lo descrito anteriormente y con nuestros hallazgos en la pérdida de precipitación por ZV, podemos decir que si la transpiración aumenta en las épocas de lluvia, entonces existe la posibilidad de que el Bosque Seco Tropical sea una de las ZV con mayor promedio de pérdida de precipitación por el proceso de T, al igual que los BMHMBS, BHPT y BHMBT, y los bosques pluviales presentan promedios más bajos porque poseen las precipitaciones más altas y constantes, la transpiración disminuye con la humedad de hojas, suelo y baja radiación persistente. Sin embargo, es importante resaltar que esta investigación considera las firmas isotópicas de los flujos de agua a nivel de país, por ser a una escala mayor pueden existir rangos diferentes de pérdida de la precipitación, de igual forma el estudio de Moore y Aparecido (2018), lo hacen en una escala pequeña a nivel de cuenca y en diferentes estratos del bosque lo que hace más factible de identificar que etapa del bosque tiene mayor tasa de transpiración y cuáles podrían ser esas condiciones ambientes que propician los cambios en la transpiración.

3.6 Pérdida de agua en el balance hidrológico de Costa Rica

La precipitación es el principal componente de entrada que tiene un balance hidrológico, por eso es importante monitorear su movimiento dentro del ciclo hidrológico, de esta manera se cuantificó su pérdida para el territorio costarricense en tres componentes, la transpiración, evaporación y la intercepción (I) por las diferentes coberturas vegetales. Con el modelo global de GLEAM que utiliza observaciones satelitales actuales de las variables climáticas y ambientales, se realizó la estimación del componente de la intercepción. Según los resultados de este modelo la pérdida de precipitación por I en promedio anual es de $\pm 10\%$ (230 mm anuales) con desviación estándar de 3%, y la pérdida de la precipitación anual por la transpiración y evaporación, se cuantificó mediante el método isotópico que presentó un resultado de $\pm 38\%$ (1085 mm anuales) con desviación estándar de 12% y $\pm 7\%$ (192 mm anuales) por evaporación con desviación estándar de 3% (figura 15).

Los porcentajes de precipitación que se pierden en Costa Rica concuerdan con los expuestos por Schlesinger y Jasechko (2014), estos autores mencionan que la transpiración tiene una relación directa con el ciclo global del agua ya que puede crear algún tipo de fuerza dominante, debido a que reintegra a la atmósfera aproximadamente entre $10 \pm 39\%$ de la precipitación. También, se esperan cambios en la transpiración generados por diferentes perturbaciones en los ecosistemas terrestres, emisiones de CO₂ y cambio climático, cuyas consecuencias serán negativas en los flujos de agua superficial (escorrentía) y recarga hídrica de los acuíferos, además, la cantidad de la precipitación y los atributos de la cobertura vegetal tendrán efectos complementarios en los componentes de la ET (Paschalis *et al.* 2018).

Es interesante encontrar resultados que están dentro de los rangos de otras investigaciones como Whitehead y Beadle (2004) que determinaron en los bosques tropicales por tener altos eventos de precipitación con mucha intensidad, la lluvia que se evapora por intercepción suele ser menor al 10%. De esta forma, tenemos que para Costa Rica la intercepción presenta una pérdida de precipitación del

10%, y, posiblemente en zonas donde existe mayor vegetación se encuentran los valores más altos de intercepción, la funcionalidad de la vegetación es compleja. Este es el caso de los bosques tropicales considerados los ecosistemas más complejos por su alto grado de diversidad y estructura vegetativa (Moore y Aparecido, 2018). Además, Good *et al* (2017) mencionan la importancia que tiene la partición de los procesos de pérdida de agua, para el uso biológico de los ecosistemas, actualmente la transpiración está capacitada para fraccionar la mayor cantidad de precipitación, pero si la pérdida de agua (evapotranspiración) supera ligeramente a la entrada (precipitación), entonces existirán cambios y posiblemente las plantas transpiren menos precipitación de la que necesitan para su funcionamiento.

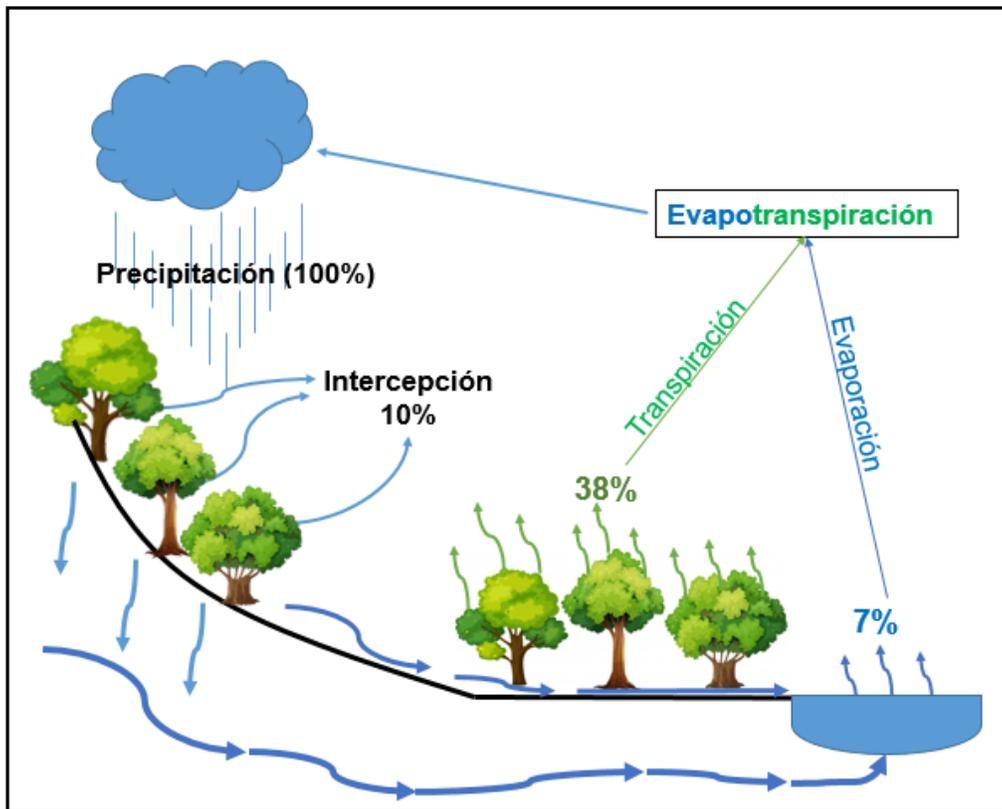


Figura 15. Pérdida de agua en Costa Rica por los diferentes procesos que influyen en el ciclo hidrológico.

3. CONCLUSIONES

Para Costa Rica el flujo de agua verde (transpiración) representa la mayor pérdida de vapor de agua por las coberturas vegetales, siendo este un 85%, y el otro 15% corresponde al flujo de agua azul (evaporación), es decir, por vapor de agua de los cuerpos de agua y del suelo.

La zona costera del Mar Caribe presenta los mayores valores de transpiración, con respecto a la zona costera del Mar Pacífico.

Todos los modelos y métodos utilizados para cuantificar la transpiración a nivel global y local indican que la transpiración es la que representa mayor aporte a la evapotranspiración. Por otra parte, las coberturas forestales densas son consideradas con la tasa de transpiración más alta, se puede decir que esta sería una de las razones por las que la transpiración representa el mayor flujo de agua en la evapotranspiración de Costa Rica, ya que actualmente se considera tiene aproximadamente el 70% de su territorio con cobertura forestal.

La zona seca de Costa Rica presenta los rangos con valores más bajos de transpiración, esto debido a que los bosques tienen una época en el año en que pierden sus hojas, y por lo tanto la transpiración es menor.

La transpiración en las zonas de vida depende de las condiciones, variables y factores climáticos de los espacios geográficos con característica específicas y respuestas eco fisiológicas de las plantas. Por lo tanto, cada una de las zonas de vida presenta diferentes tasas de transpiración anual para el territorio de Costa Rica.

4. RECOMENDACIONES

La escala de tiempo utilizada para esta investigación fue anual por lo que se recomienda realizarla en escala mensual para conocer con mayor relevancia a que se deben los rangos altos en algunas zonas del país.

A pesar de que se realizó un análisis de las tasas de transpiración por ZV, sería importante hacerlo por tipo de cobertura vegetal para todo el país, de esta manera conocer en qué tipos de bosques se encuentra la tasa de transpiración, ya que Costa Rica a punta a tener mayores áreas con coberturas vegetal.

Los resultados muestran que la zona costera del mar Caribe de Costa Rica presenta mayor tasa de transpiración con respecto a la del Pacífico, por lo que, se recomienda realizar un estudio con esta misma metodología en cada zona, pero en escala mensual y conocer cuál es el factor que marca esa diferencia de transpiración entre ambas zonas.

5. LITERATURA CITADA

Aparecido, LMT; Miller, GR; Cahill, AT; Moore, GW. 2016. Comparison of tree transpiration under wet and dry canopy conditions in a Costa Rican premontane tropical forest. *Hydrological Processes* 30(26):5000-5011.

Bruijnzeel, LA. 1990. Hydrology of moist tropical forests and effects of conversion: A state of knowledge review. (en línea). *Journal of Hydrology* 129(1-4):397-399. Disponible en <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/002216949190061L>

- Bruijnzeel, LA; Mulligan, M; Scatena, FN. 2010. Hydrometeorology of tropical montane cloud forests: Emerging patterns. s.l., s.e. 465-498 p.
- Cappa, CD. 2003. Isotopic fractionation of water during evaporation. *Journal of Geophysical Research* 108(D16): s.p.
- Cernusak, LA; Barbour, MM; Arndt, SK; Cheesman, AW; English, NB; Feild, TS; Helliker, BR; Holloway-Phillips, MM; Holtum, JAM; Kahmen, A; Mcinerney, FA; Munksgaard, NC; Simonin, KA; Song, X; Stuart-Williams, H; West, JB; Farquhar, GD. 2016. Stable isotopes in leaf water of terrestrial plants. s.l., Blackwell Publishing Ltd. 1087-1102 p.
- Conroy, JL; Cobb, KM; Noone, D. 2013. Comparison of precipitation isotope variability across the tropical Pacific in observations and SWING2 model simulations. *Journal of Geophysical Research Atmospheres* 118(11):5867-5892.
- Derguy, MR; Drozd, AA; Arturi, MF; Nartinuzzi, S; Toledo, L; Frangi, JL. 2016. Aplicación del modelo de clasificación ecológica de Holdridge para la república argentina a partir del análisis espacial de datos. Argentina. En línea. Consultado el 25 de jun. 2019. Disponible en <https://www.researchgate.net/publication/317411919>
- Esquivel-Hernández, G; Mosquera, GM; Sánchez-Murillo, R; Quesada-Román, A; Birkel, C; Crespo, P; Célleri, R; Windhorst, D; Breuer, L; Boll, J. 2019. Moisture transport and seasonal variations in the stable isotopic composition of rainfall in Central American and Andean Páramo during El Niño conditions (2015–2016). *Hydrological Processes*. s.p.
- Giambelluca, TW; Ziegler, AD; Nullet, MA; Truong, DM; Tran, LT. 2003. Transpiration in a small tropical forest patch. *Agricultural and Forest Meteorology* 117(1-2):1-22.
- Gibson, JJ; Edwards, TWD. 2002. Regional water balance trends and evaporation-transpiration partitioning from a stable isotope survey of lakes in northern Canada. (en línea). *Global Biogeochemical Cycles* 16(2):10-1-10-14. Disponible en <http://doi.wiley.com/10.1029/2001GB001839>
- Good, SP; Moore, GW; Miralles, DG. 2017. A mesic maximum in biological water use demarcates biome sensitivity to aridity shifts. (en línea). *Nature Ecology and Evolution* 1(12):1883-1888. Disponible en <http://dx.doi.org/10.1038/s41559-017-0371-8>
- Good, S. P., Noone, D., & Bowen, G. (2015). Hydrologic connectivity constrains partitioning of global terrestrial water fluxes. *Science*, 349(6244), 175-177. doi:10.1126/science.aaa5931
- Granier, A; Biron, P; Lemoine, D. 2000. Water balance, transpiration and canopy conductance in two beech stands. *Agricultural and Forest Meteorology* 100(4):291-308.
- Guillen, A; Araiza, L a; Cerna, E; Valenzuela, J; Uanl, JL; Nicolás, S; Coah, S. 2012. Métodos No Paramétricos de Uso Común. *DAENA: International Journal of Good Conscience* 7(1):132-155.

- Horita, J; Wesolowski, DJ. 1994. Liquid-vapor fractionation of oxygen and hydrogen isotopes of water from the freezing to the critical temperature (en línea). 58(16):1-13. Consultado el 10 de jun. 2019. Disponible en: papers2://publication/uuid/F9BCD32F-8569-4ACF-81AF-08518BF40A32
- Jasechko, S; Sharp, ZD; Gibson, JJ; Birks, SJ; Yi, Y; Fawcett, PJ. 2013. Terrestrial water fluxes dominated by transpiration. *Nature* 496(7445):347-350.
- Kulmatiski, A; Beard, KH; Verweij, RJT; February, EC. 2010. A depth-controlled tracer technique measures vertical, horizontal and temporal patterns of water use by trees and grasses in a subtropical savanna. *New Phytologist* 188(1):199-209.
- Lazo, PX; Mosquera, GM. 2012. Fraccionamiento y concentración de deuterio ($\delta^2\text{H}$) y oxígeno-18 ($\delta^{18}\text{O}$) en diferentes fuentes de agua que aportan a la cuenca del río Zhurucay. Tesis de ingeniería. Universidad de Cuenca. En línea. Consultado el 27 de jun. 2019. Disponible en: <http://dspace.ucuenca.edu.ec/jspui/bitstream/123456789/758/1/ti884.pdf>
- MAG (Ministerio de Agricultura y Ganadería). 2010. Caracterización biofísica de las zonas definidas para la implementación de las opciones de cosecha de agua. En línea. Consultado el 20 de jun. 2019. Disponible en: http://www.mag.go.cr/biblioteca_virtual/bibliotecavirtual/a00269.pdf
- Martens, B; Miralles, DG; Lievens, H; Van der Schalie, R; De Jeu, RAM; Fernández-Prieto, D; Beck, HE; Dorigo, WA; y Verhoest, NEC. 2017. GLEAM v3: satélite basado en la evaporación de la tierra y la humedad del suelo de la zona radicular, *Geoscientific Model Development*, 10, 1903–1925, doi: 10.5194 / gmd-10-1903-2017.
- Miralles, DG; Holmes, TRH; De Jeu, RAM; Gash, JH; Meesters, AGCA y Dolman, AJ. 2011. Evaporación global de la superficie terrestre estimada a partir de observaciones basadas en satélites, *Hydrology and Earth System Sciences*, 15, 453–469, doi: 10.5194 / hess-15-453-2011.
- Moore, G; Aparecido, LM. 2018. Sap flux measurements in wet tropical forests: unique challenges and opportunities. 109-118 p. doi 10.17660/ActaHortic.2018.1222.15
- Moore, G; Orozco, G; Aparecido, LM; Miller, G. 2017. Upscaling transpiration in diverse forests: Insights from a tropical premontane site. doi 10.1002/eco.1920
- Morán, MS; Scott, RL; Keefer, TO; Emmerich, WE; Hernandez, M; Nearing, GS; Paige, GB; Cosh, MH; O'Neill, PE. 2009. Partitioning evapotranspiration in semiarid grassland and shrubland ecosystems using time series of soil surface temperature. *Agricultural and Forest Meteorology* 149(1):59-72.
- Moreira, M. Z., Sternberg, L., Martinelli, L. A., Victoria, R. L., Barbosa, E. M., Bonates, L. C. M., & Nepstad, D. C. (1997). Contribution of transpiration to forest ambient vapour based on isotopic measurements. In *Global Change Biology* (5 ed., Vol. 3, pp. 439-450)
- O'Brien, JJ; Oberbauer, SF; Clark, DB. 2004. Whole tree xylem sap flow responses to multiple environmental variables in a wet tropical foresto. Department of Biological Sciences, Florida International University. (2004). Vol. 27, 551-567.

- Or, D; Lehmann, P; Shahraeeni, E; Shokri, N. 2013. Advances in Soil Evaporation Physics A Review. *Vadose Zone Journal* 12(4):0. Doi:10.2136/vzj2012.0163
- Paschalis, A; Fatichi, S; Pappas, C; Or, D. 2018. Covariation of vegetation and climate constrains present and future T/ET variability. *Environmental Research Letters* 13(10):s.p.
- Quade, M; Klosterhalfen, A; Graf, A; Brüggemann, N; Hermes, N; Vereecken, H; Rothfuss, Y. 2019. In-situ monitoring of soil water isotopic composition for partitioning of evapotranspiration during one growing season of sugar beet (*Beta vulgaris*). *Agricultural and Forest Meteorology* 266-267:53-64.
- Sánchez-Murillo, R; Birkel, C. 2016. Groundwater recharge mechanisms inferred from isoscapes in a complex tropical mountainous region. *Geophysical Research Letters* 43(10):5060-5069
- Sánchez-Murillo, R; Esquivel-Hernández, G; Welsh, K; Brooks, ES; Boll, J; Alfaro-Solís, R; Valdés-González, J. 2013. Spatial and Temporal Variation of Stable Isotopes in Precipitation across Costa Rica: An Analysis of Historic GNIP Records. *Open Journal of Modern Hydrology* 3(October):226-240
- Schlesinger, WH; Jasechko, S. 2014. Transpiration in the global water cycle. *Agricultural and Forest Meteorology* 189-190:115-117.
- Su, Y; Shao, W; Vlček, L; Langhammer, J. 2019. Ecohydrological Behaviour of Mountain Beech Forest: Quantification of Stomatal Conductance Using Sap Flow Measurements. (en línea). *Geosciences* 9(5):243. Disponible en <https://www.mdpi.com/2076-3263/9/5/243>
- Sun, S; Meng, P; Zhang, J; Wan, X; Zheng, N; He, C. 2014. Partitioning oak woodland evapotranspiration in the rocky mountainous area of North China was disturbed by foreign vapor, as estimated based on non-steady-state ^{18}O isotopic composition. *Agricultural and Forest Meteorology* 184:36-47.
- Tarin, T; Yépez, EA; Garatuza-Payán, J; Watts, CJ; Rodríguez, JC; Vivoni, ER; Méndez-Barroso, LA. 2014. Partición de la evapotranspiración usando isótopos estables en estudios ecohidrológicos. *Tecnología y Ciencias del Agua* 5(3):97-114.
- Wang, P; Yamanaka, T; Li, XY; Wei, Z. 2015. Partitioning evapotranspiration in a temperate grassland ecosystem: Numerical modeling with isotopic tracers. (en línea). *Agricultural and Forest Meteorology* 208(August):16-31. Disponible en <http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.04.006>
- Wei, Z; Yoshimura, K; Wang, L; Miralles, DG; Jasechko, S; Lee, X. 2017. Revisiting the contribution of transpiration to global terrestrial evapotranspiration. *Geophysical Research Letters* 44(6):2792-2801.
- Welsh, K; Boll, J; Sánchez-Murillo, R; Roupsard, O. 2018. Isotope hydrology of a tropical coffee agroforestry watershed: Seasonal and event-based analyses. *Hydrological Processes* 32(13):1965-1977.

- Yamanaka, T; Sunakawa, A. 2017. Isotopic signature of evapotranspiration flux and its use for partitioning evaporation/transpiration components. *Tsukuba Geoenvironmental Sciences*. Vol. 3. 11-2
- Yepez, EA; Huxman, TE; Ignace, DD; English, NB; Weltzin, JF; Castellanos, AE; Williams, DG. 2005. Dynamics of transpiration and evaporation following a moisture pulse in semiarid grassland: A chamber-based isotope method for partitioning flux components. *Agricultural and Forest Meteorology* 132(3-4):359-376.
- Yepez, EA; Williams, DG; Scott, RL; Lin, G. 2003. Partitioning overstory and understory evapotranspiration in a semiarid savanna woodland from the isotopic composition of water vapor. *Agricultural and Forest Meteorology* 119(1-2):53-68.
- Yue, T-X; Liu, J; Jørgensen, SE; Gao, Z; Zhang, S; Deng, X. 2001. Changes of Holdridge life zone diversity in all of China over half a century. 153-162 p. doi 10.1016/S0304-3800(01)00370-2
- Zhang, MJ y Wang, SJ. 2018. Precipitation isotopes in the Tianshan Mountains as a key to water cycle in arid central Asia. *Sciences in Cold and Arid Regions*, 10(1): 27-37. DOI: 10.3724/SP.J.1226.2018.00027. Disponible en <http://www.scar.ac.cn/article/other/2018/01/20180103.htm>
- Zongxing, L; Qi, F; Wang, QJ; Yanlong, K; Aifang, C; Song, Y; Yongge, L; Jianguo, L; Xiaoyan, G. 2016. Contributions of local terrestrial evaporation and transpiration to precipitation using $\delta^{18}\text{O}$ and D-excess as a proxy in Shiyang inland river basin in China *Global and Planetary Change* 146:140-151. Disponible en <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921818116303368> doi <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2016.10.003>

Artículo 2. Partición del agua azul y verde a escala mensual para la cuenca del río San Carlos

RESUMEN

La cuenca es considerada a nivel global como la unidad territorial más importante para el manejo y gestión del recurso hídrico, de tal manera que es importante la cuantificación de sus flujos tanto de entrada como los de salida. El método más común de cuantificar el recurso hídrico en las cuencas es un balance hídrico, sin embargo, una opción para el monitoreo de los flujos de salida es la utilización de isótopos como trazadores. Este método permite la cuantificación de los flujos de agua azul (E) y verde (T). En este estudio se realizó la cuantificación de los flujos de agua azul y verde en la cuenca del río San Carlos, Costa Rica, con el objetivo de analizar el comportamiento de estos flujos a lo largo de los meses del año. Se utilizaron isótopos estables de agua (deuterio, $\delta^2\text{H}$ y oxígeno, $\delta^{18}\text{O}$) correspondientes a muestras de agua de precipitación, aguas superficiales y subterráneas, además de otras variables como humedad relativa, temperatura ($^{\circ}\text{K}$) e intercepción de la lluvia. El modelo isotópico aplicado es el propuesto por Gibson *et al.* (2002) y Jasechko *et al.* (2013), el cual permite la partición de flujos mediante un balance de masa, considerando cada uno de los componentes y flujos de agua mediante la composición isotópica, teniendo como resultado la separación de la Transpiración/Evapotranspiración (T/ET). Los resultados del modelo isotópico revelan que la cuenca del río San Carlos tiene una transpiración máxima mensual de 129 mm registrada en el mes de marzo, por otra parte, septiembre y noviembre presentan los promedios más bajos con 64 mm. El fraccionamiento de la ET fue de 0.63 a 0.92 en el flujo verde (T) y el 0.08 a 0.37 en el flujo azul. La transpiración representa el 76% del aporte a la ET en el área de la cuenca del río San Carlos y la evaporación un 24% con una desviación estándar de 9%. La pérdida de agua en la cuenca se debe en su mayor parte a la transpiración con el 17%, mientras que la evaporación contribuye con el 5% y la intercepción, con un 5%.

Palabras clave: Partición isotópica, ciclo hidrológico, cuenca del río San Carlos, agua verde y azul, cobertura vegetal

ABSTRACT

At a global level catchment are considered as the most important territorial units for the management of water resources, therefore it is important to quantify the in- and outflows properly. The water balance is the most popular method for quantifying water resources in catchments; however, the use of isotopes as tracers is an alternative option for monitoring outflows. Furthermore, this method allows for the quantification of blue (E) and green (T) water flows. In this study, the quantification of blue and green water flows in the San Carlos river basin, Costa Rica, was carried out. The aim was to analyze the behavior of these flows throughout the year. The available data includes water stable isotopes (deuterium, $\delta^2\text{H}$ and oxygen, $\delta^{18}\text{O}$) from samples of precipitation, surface water and groundwater, as well as other variables such as relative humidity, temperature ($^{\circ}\text{K}$) and rain interception. An isotopic model (see Gibson *et al.* 2002; Jasechko *et al.* 2013), was applied to the case study. The model allows partitioning of flows by means of mass balance, considering each of the components and water flows by means of the isotopic composition, resulting in the separation of Transpiration/Evapotranspiration (T/ET). The results reveal that the San Carlos river basin has a maximum monthly transpiration of 129 mm, for the month of

March. On the other hand, September and November present the lowest averages with 64 mm. The ET fractionation was 0.63 to 0.92 for the green flow (T) and 0.08 to 0.37 for the blue flow. Transpiration represents 76% of the ET contribution in the San Carlos river basin area and evaporation 24% with a standard deviation of 9%. Transpiration contributes to most of the water loss in the basin with a total of 18%, whereas evaporation and interception contribute to around 5% each.

Key words: Isotopic partition, hydrological cycle, San Carlos river basin, green and blue water, vegetation cover.

1. INTRODUCCIÓN

Los isótopos estables de agua se utilizan como trazadores en la eco hidrología para monitorear el almacenamiento, transporte y la posible mezcla que puede existir a través de su paso por el ciclo hidrológico en los diferentes paisajes ecosistémicos (Benettin *et al.* 2018). Comprender el funcionamiento de la cobertura vegetal en el almacenamiento y flujo del agua en el suelo, permite analizar con claridad el uso de estos dos recursos para prevenir futuras consecuencias por el cambio climático (Sprenger *et al.* 2017).

Por otra parte, los isótopos permiten obtener diagnósticos de los cambios en el balance hidrológico en respuesta a la demanda del uso del agua y cambios de uso del suelo (Welp *et al.* 2008). Los bosques especialmente en los trópicos sufren consecuencias de cambios de uso, lo que provoca una alteración en el balance hidrológico, generando un desequilibrio en el uso de agua por las plantas para el proceso de fotosíntesis y transpiración, de igual forma, los cambios de uso generan un desequilibrio en la interceptación de la lluvia, nubes y disminución de los flujos de agua en una cuenca (Bruijnzeel 2001).

Dada la importancia de análisis de la transpiración en los ecosistemas y procesos naturales, el uso de isótopos permite encontrar indicadores del movimiento del agua en las coberturas vegetales y con ello estimar la contribución de la transpiración del ecosistema a la evapotranspiración total (Dubbert *et al.* 2013). De acuerdo con Hu *et al.* (2018) los resultados obtenidos con la aplicación de los modelos isotópicos aportan información concreta para que los responsables o tomadores de decisiones establezcan políticas o estrategias para maximizar el uso del agua en las diferentes actividades humanas y de esta manera comprender con claridad la conexión existente entre agua, vegetación, suelo y atmosfera. Por ejemplo, una de esa alternativa de decisión para optimizar la gestión del recurso hídrico es la diversificación de especies ya que estas influyen entre sí, para hacer disponibles los recursos (Hölscher y Ammer, 2010).

Para contribuir con el conocimiento acerca del movimiento de los flujos de agua se plantea esta investigación en la cuenca del río San Carlos, Costa Rica partiendo del uso de datos isotópicos mensuales que permitan cuantificar los flujos mensuales de agua azul y verde.

2. METODOLOGÍA

2.1 Área de estudio

El estudio se realizó en la cuenca del río San Carlos que se encuentra ubicada en la provincia de Alajuela, Costa Rica, limitando al Norte con el río San Juan y el límite fronterizo de Nicaragua ($10^{\circ}45'21.93''N$ y $84^{\circ}12'26.56''W$), al Sur con la provincia de Puntarenas ($10^{\circ}11'1.73''N$ y $84^{\circ}32'5.80''W$), al Oeste con la laguna Arenal y la provincia de Guanacaste ($10^{\circ}28'56.20''N$ y $84^{\circ}44'14.77''W$) y al Este con la provincia de Heredia ($10^{\circ}20'58.93''N$ y $84^{\circ}15'51.07''W$), la altitud con respecto al nivel mar va desde los 30 hasta 2200 msnm, con una precipitación media anual de aproximadamente 4200 mm, temperaturas promedio de aproximadamente de $26^{\circ}C$ y humedad relativa de aproximadamente 84%. La cuenca tiene una superficie de $2,564.75 \text{ km}^2$ (Figura 16).

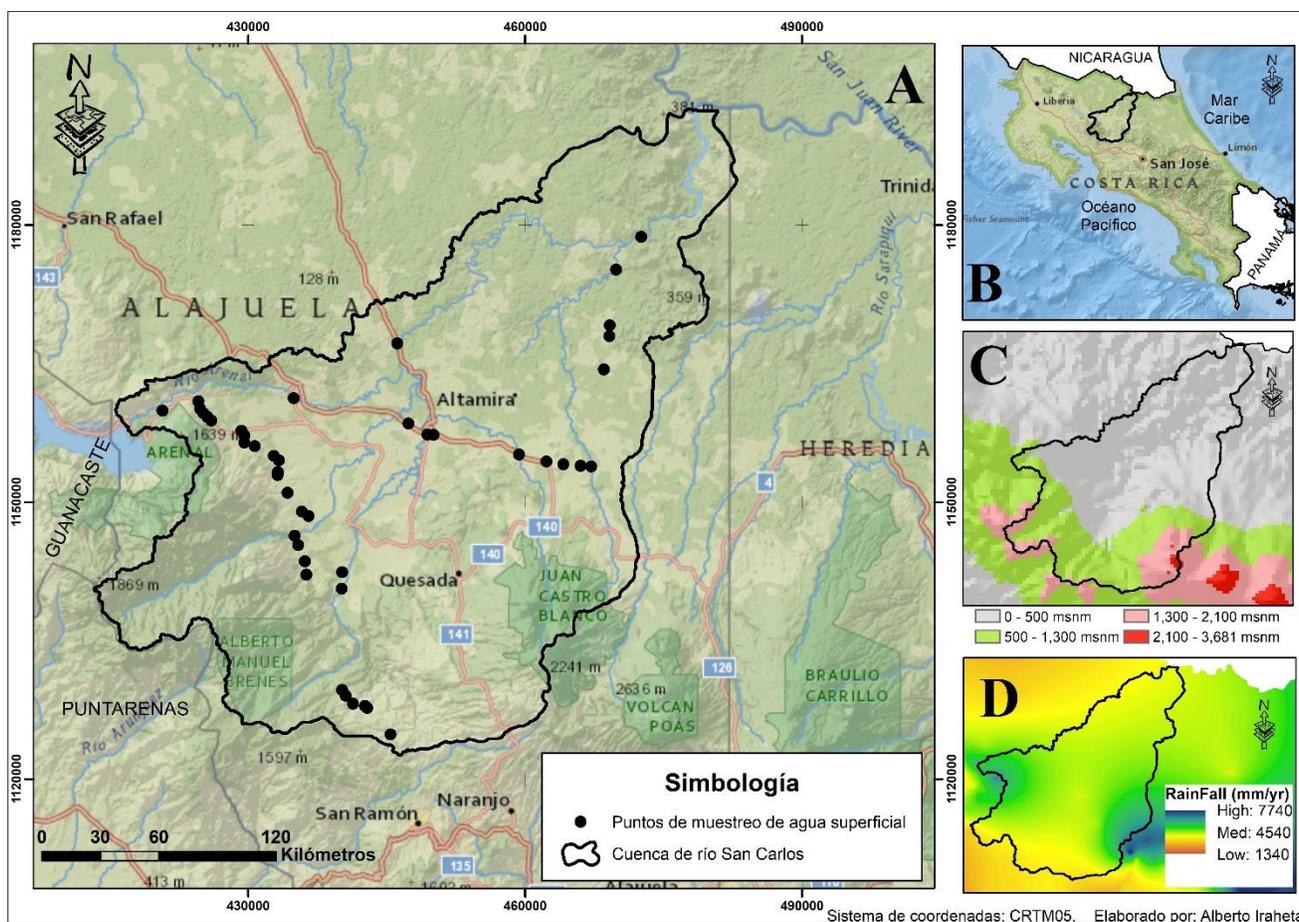


Figura 16. Área de estudio: A) Cuenca del río San Carlos con puntos de muestreo isotópico mensual, B) Ubicación de la cuenca en Costa Rica, C) Elevación para el área de estudio y D) Precipitación anual para el área de estudio.

2.2 Proceso metodológico

El proceso metodológico utilizado en este estudio es el mismo descrito en el capítulo II del presente documento, es decir, la implementación del modelo isotópico basado en un balance de masas utilizado por Gibson *et al.* (2002) y Jasechko *et al.* (2013). Con la diferencia que este estudio se realizó en una escala espacial más pequeña, en la cuenca San Carlos, las variables utilizadas fueron las mismas, pero en una escala de tiempo mensual. Se utilizaron datos de isótopos estables (deuterio y oxígeno-18) de agua (superficial, subterránea y precipitación). Se realizó la partición de E y T en la evapotranspiración dentro del área de la cuenca, utilizando el balance de masa para obtener un resultado de la pérdida de agua por la transpiración y separación de los flujos de agua verde y azul por mes.

Los datos isotópicos se obtuvieron de muestras de agua superficial recolectadas en jornadas de muestreo en todo el mes del año 2018 y parte del 2019, en diferentes nacientes de agua superficial de la cuenca, los de agua subterránea fueron recolectados en distintas zonas del país, las muestras de precipitación fueron tomadas en distintas estaciones meteorológicas del país en los meses del año. De igual forma, las muestras fueron analizadas en el laboratorio de hidrología isotópica de la Universidad Nacional de Costa Rica (UNA) utilizando un Picarro L2120-I, con analizadores actuales con precisión de 0,1‰ $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ y 0,5‰ $^2\text{H}/^1\text{H}$. Las muestras isotópicas puntuales fueron interpoladas espacialmente mediante el método de Interpolación con la Distancia Inversa Ponderada (siglas en inglés IDW) para obtener paisajes isotópicos (“isoscapes”) a un tamaño píxel de 100 m a escala de la cuenca.

Estos paisajes isotópicos en conjunto con otros datos tomados de Global Weather Data (Datos Meteorológicos Globales), Global Land Evaporation Amsterdam Model (siglas en inglés GLEAM) y MODIS forman la base para el modelo isotópico de separación de flujos T/ET, en escala mensual de cuenca San Carlos, Costa Rica como se muestra en la figura 17. Podemos observar que existe una combinación de procesos todos con sus firmas isotópicas, además, se incluye el componente cinético del proceso de evaporación, es decir, este es definido de acuerdo a la separación de los átomos del agua, cabe mencionar que cada proceso las firmas isotópicas son diferentes y eso lo que permite tener datos para separar un flujo de otro, sabiendo que la evaporación tiene un fraccionamiento isotópico menos enriquecido, caso contrario en el proceso de la transpiración surge un enriquecimiento isotópico y este se encuentra definido por la longitud de transporte del agua y la cantidad de transpiración. Entonces la combinación de estos procesos en el modelo de masa fundamentado en las firmas isotópicas da apertura a encontrar cual agua proviene de un proceso de evaporación y de la transpiración.

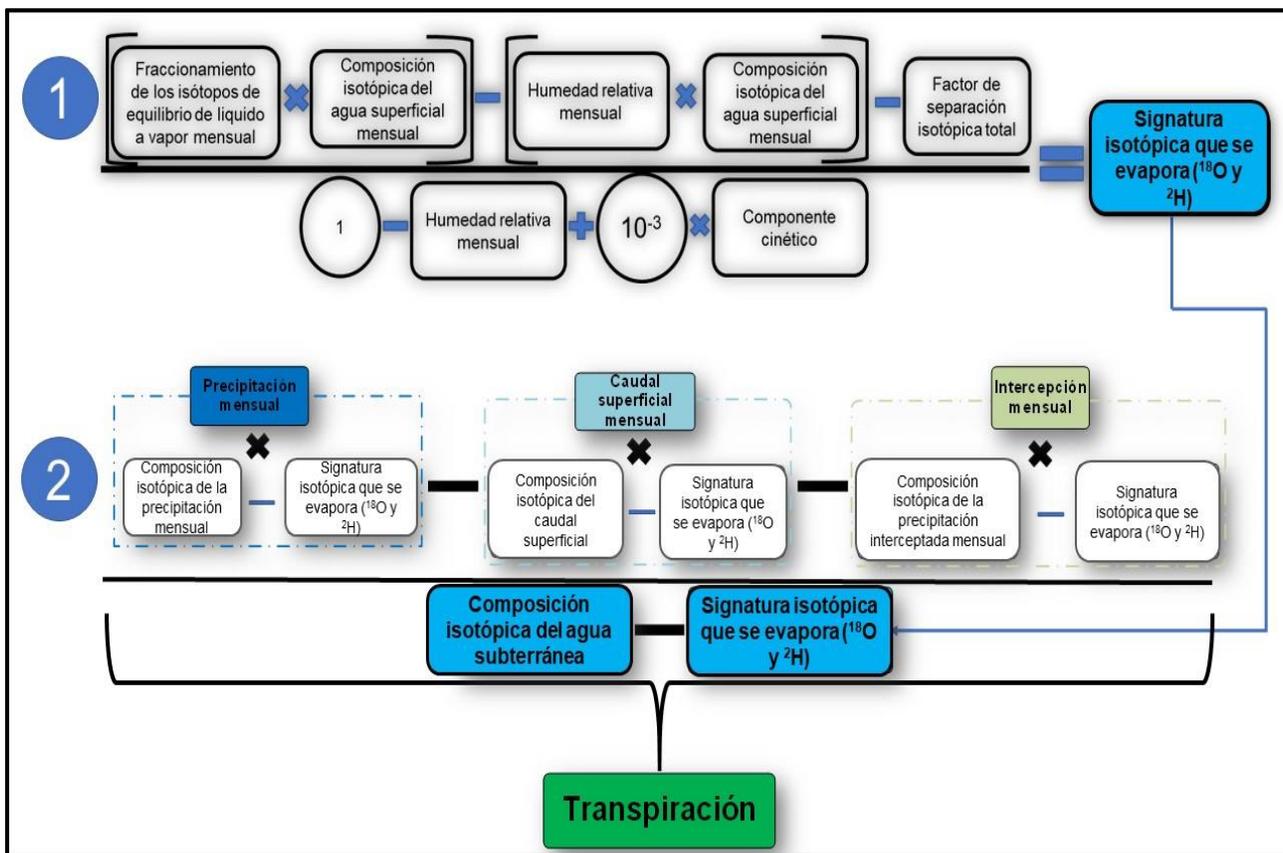


Figura 17. Esquema metodológico utilizado para el modelo isotópico de separación de flujos T/ET.

3. . RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Transpiración en la cuenca de San Carlos

Los hallazgos de la investigación muestran que en la cuenca del río San Carlos la transpiración varía mensualmente, existe una tendencia marcada ya que la transpiración aumenta en el mes de diciembre, alcanzando los máximos valores de T en el mes de marzo, luego en el mes de abril los valores de transpiración descienden, manteniendo una transpiración casi constante desde junio hasta noviembre. El promedio máximo de transpiración mensual es de 129 mm en el mes marzo con valores máximos hasta de 144 mm, mientras que los meses de septiembre y noviembre presentan los promedios más bajos de transpiración 64 mm (figura 18).

Estos resultados de transpiración para la cuenca del río San Carlos muestran un patrón con respecto a las épocas que presenta Costa Rica, una seca y la otra lluviosa, es decir, cuando inicia la época lluviosa tiende a disminuir la tasa de transpiración, caso contrario en la época seca, presenta valores más altos. Asimismo, lo señala Moore y Aparecido (2018) que la transpiración en los bosques tropicales húmedos se registra en el mes más seco del año.

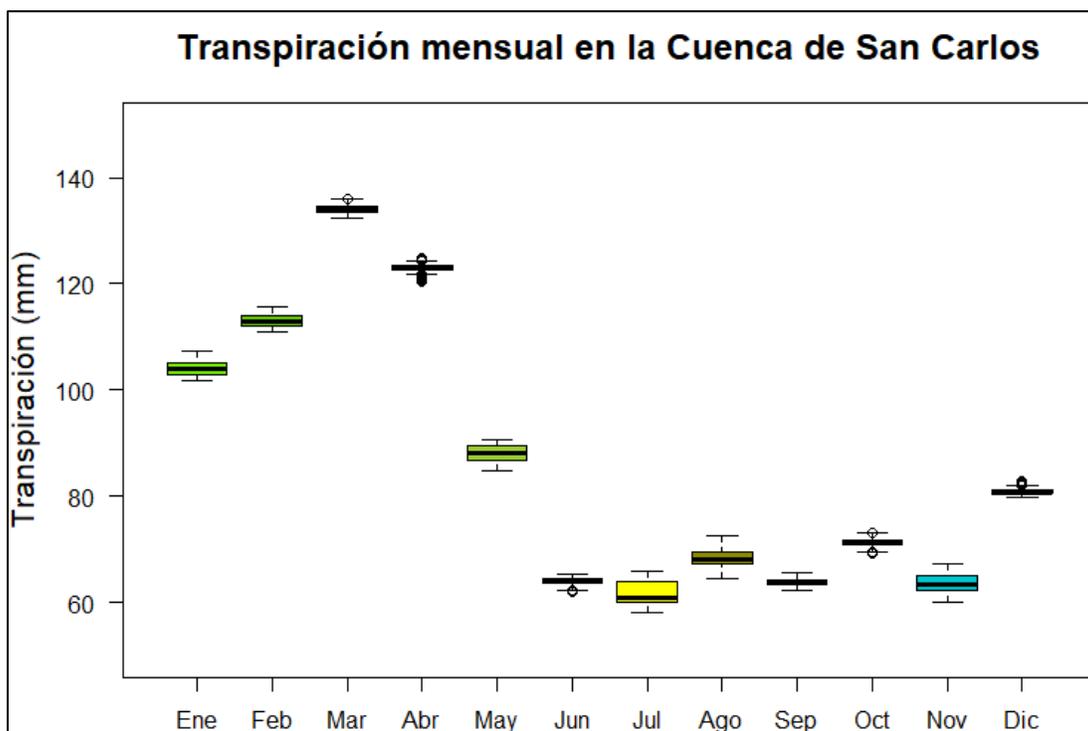


Figura 18. Distribución de la transpiración mensual en la cuenca del río San Carlos, Costa Rica

Por su ubicación geográfica Costa Rica no tiene cuatro estaciones definidas, por lo que, sus estaciones están compuesta por una época seca y lluviosa, la época seca inicia en el mes de diciembre y termina en mayo y la época lluviosa es de junio a noviembre, entre los meses de marzo y abril se registran las temperaturas más altas (Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica-IMN5). Comparando los patrones climáticos reportados por el IMN, se observa que existe una relación directa con el patrón de transpiración que se encontró en la cuenca, debido a que en marzo se encuentra el mayor promedio de temperatura, mayor intensidad de la radiación solar y presión de vapor de agua, la humedad relativa de la atmósfera tiende a ser más baja, esta combinación de las variables hace posible que para este mes del año exista el mayor valor de T, seguido de abril.

De igual forma, la disminución de la transpiración inicia en mayo porque termina la época seca e inicia la lluviosa, esto se ve reflejado en los meses de junio a noviembre que presentan la tasa de transpiración más baja y casi constante durante la temporada de lluvia.

Por lo general las plantas en la época seca para subsistir utilizan agua subterránea, aproximadamente el 49% de la transpiración en época seca proviene del agua extraída de las profundidades del suelo y en la época húmeda o lluviosa las plantas transpiran el 28% de agua subterránea (Barbeta y Peñuelas 2017). Sin embargo, Meißner *et al.* (2012) menciona que la transpiración depende directamente de la capacidad de la planta para extraer el agua que se encuentra en el suelo.

⁵ <https://www.imn.ac.cr/clima-en-costa-rica>

Mientras que Aparecido *et al.* (2014) mencionan que la humedad que las hojas mantienen por tiempo prolongado inhibe la transpiración, ya que no existe ese intercambio o almacenamiento de calor que hace posible que el vapor de agua de la superficie de la hoja pueda ser evaporarse. Es decir, la hoja del árbol tiene la capacidad de almacenar calor y el único medio de disiparla o enfriarla es la transpiración (Squeo y León 2007). Pero si no existe tal condición de transferencia o liberación de calor en la hoja entonces no puede realizarse un buen proceso de la transpiración, teniendo en cuenta el factor de la radiación solar y la temperatura (Bruijnzeel *et al.* 2010).

Al realizar la distribución espacial de la transpiración por mes, encontramos que existe un patrón de transpiración bien marcado y esto se visualiza en la figura 19, tenemos que desde el mes de enero hasta abril, están los rangos de transpiración más altos de 75 a 100, de 100 a 125 y de 125 a 145 mm, siendo marzo el mes con valores más altos de transpiración se encuentran distribuidos en el rango de 100 a 145 mm, luego tenemos que los meses de junio a noviembre presentan una transpiración casi constante manteniendo rangos desde los 50 a los 75 mm, pero es interesante que los mes de mayo y diciembre tiene rangos de transpiración de 75 a 100 mm, parecen ser los meses que dividen los mese con mayor y menor transpiración.

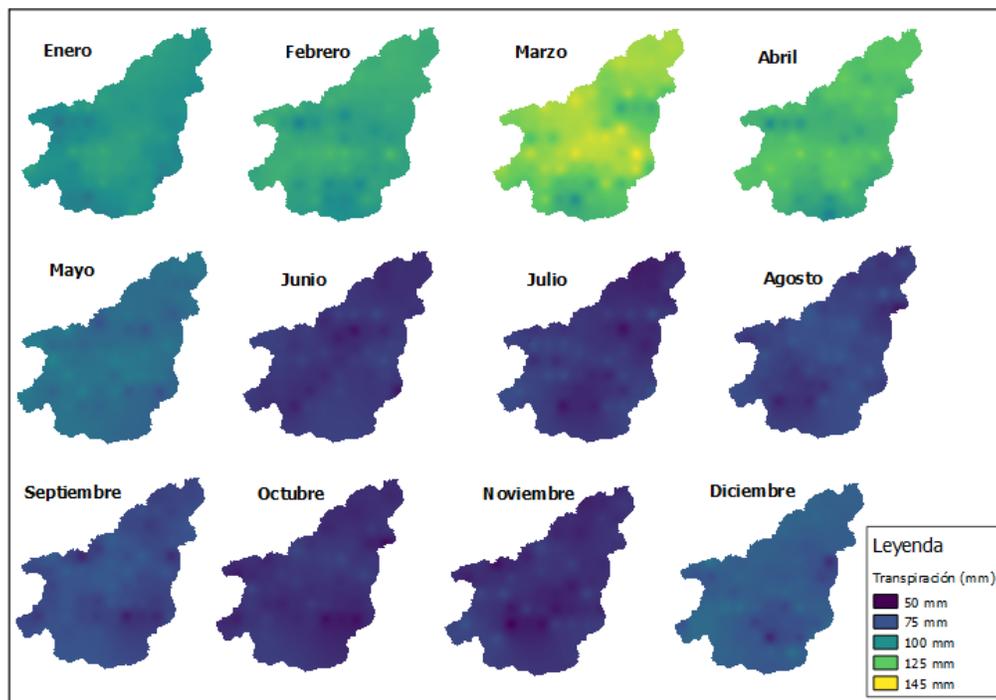


Figura 19. Distribución espacial de la transpiración mensual para la cuenca del río San Carlos

Con la realización de este tipo de investigación en escalas espaciales pequeñas y en periodos de tiempo cortos como los meses, se puede evidenciar perfectamente patrones como los encontrados en la cuenca San Carlos, que están casi definidos por las épocas lluviosa y seca. En la figura 20, se muestra la diferencia encontrada en un modelo aplicado a nivel nacional (A) y el modelo aplicado solo en el área de la cuenca (B), puede observarse que el rango de transpiración en la (A) va desde 930 hasta 1332 mm, caso contrario en (B) espacialmente se observa que tiene distribución de la transpiración va de 930 a 1000 mm.

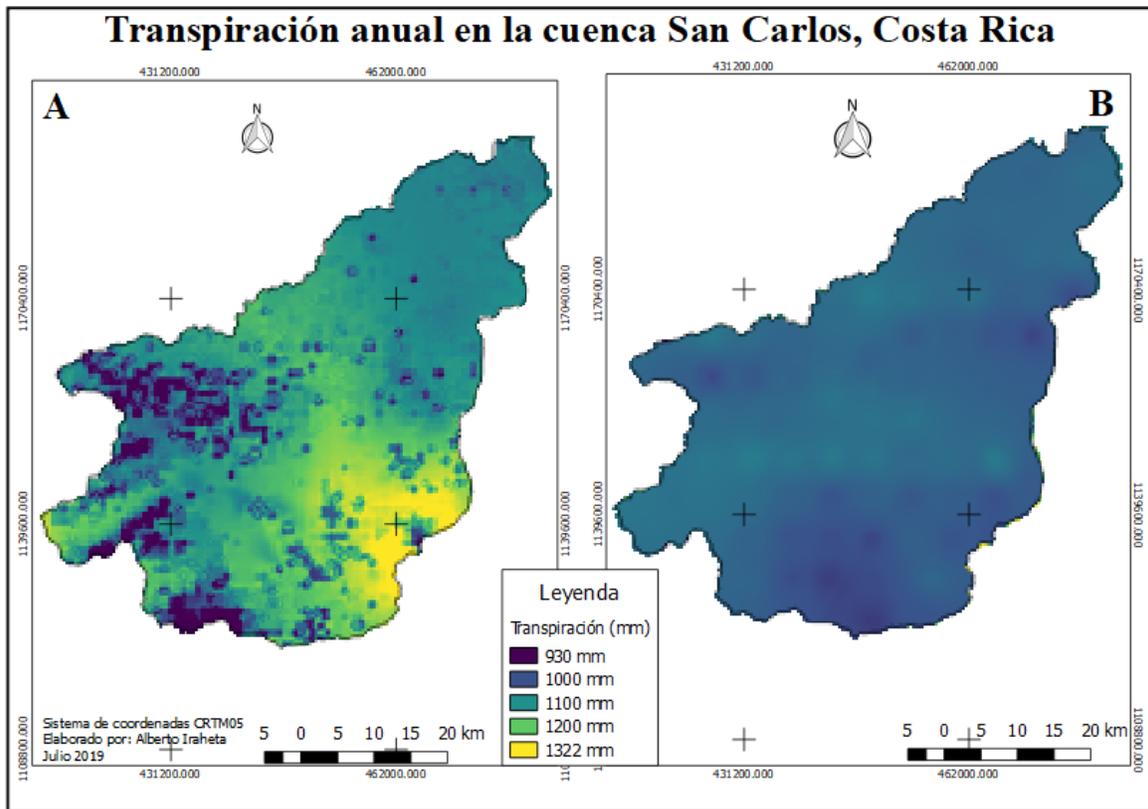


Figura 20. A) Modelo aplicado a nivel nacional y B) Modelo aplicado en el área de la cuenca

Al calcular la desviación absoluta entre el modelo que se aplicó a nivel nacional de escala anual y el modelo aplicado en el área de la cuenca a escala mensual, encontramos que existe una subestimación de la transpiración para la cuenca del río San Carlos con respecto al modelo nacional, estos valores van desde 116 a 284 mm, de igual forma, tenemos valores sobreestimados de transpiración y estos están entre -389 y -52 mm. En la figura 21 se puede observar la distribución espacial de estos valores de subestimación y sobreestimación de la transpiración. Existe la posibilidad que estos resultados de la desviación absoluta se deban al tamaño de escala que se utilizó para el modelo nacional y a los datos de promedios anuales que se utilizaron, esto podría dar la explicación de los valores de subestimación y sobreestimados entre los resultados de los dos modelos

Por estas subestimaciones y sobreestimaciones que pueden existir en la aplicabilidad del modelo en escala anual con respecto al país, sería ideal aplicar el modelo isotópico en escala mensual para todo el territorio. Y comprobar el comportamiento de la transpiración en cada mes. Esto permitiría obtener un mayor acercamiento sobre la variabilidad de la tasa de transpiración y las variables climáticas que involucra en el proceso.

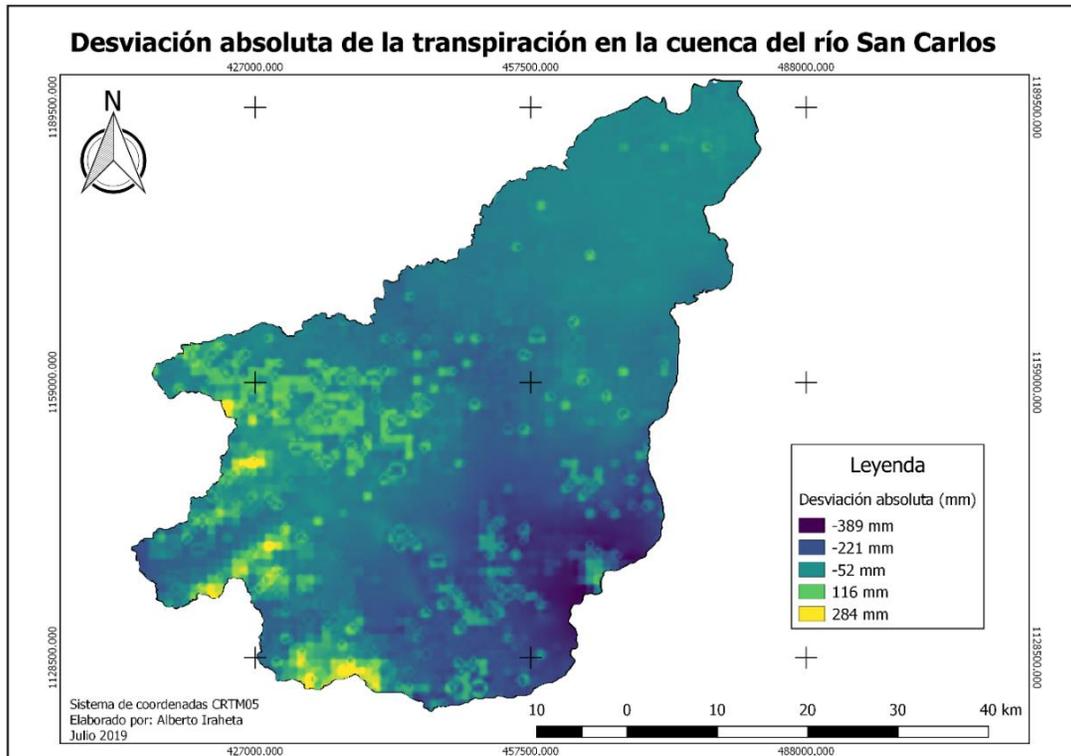


Figura 21. Desviación absoluta de la transpiración en la cuenca del río San Carlos

3.2 Partición de los flujos de agua azul y verde en la cuenca del río San Carlos

Al realizar la partición de los flujos con el modelo de balance de masa fundamentado en las firmas isotópicas de cada uno de los flujos de agua que intervienen en el proceso de la evapotranspiración, se encontró que el flujo verde (T), es el que tiene mayor aporte a la ET, mientras que el flujo azul (E) representa el menor aporte. Sin embargo, existen meses en los que la E tiene un aumento, pero aun así no supera los valores de la T, la variación de aumento y disminución de uno de los flujos corresponde a la variación del otro, es decir, cuando la transpiración aumenta en los meses de enero a mayo, la evaporación tiene una disminución. Consecuentemente cuando la E tiene su aumento en los meses de mayo a diciembre la T disminuye (figuras 22).

El análisis de la partición de los flujos, el área de la cuenca de San Carlos indica que los mayores aportes de vapor de agua a la atmósfera se dan por el proceso de la transpiración en los meses de enero a mayo, mientras que la evaporación contribuye con los menores valores. Para el flujo verde la partición del vapor de agua va desde 0.63 hasta 0.92, mientras que el flujo azul tiene una fracción que va desde 0.08 hasta 0.37. Siendo el mes de marzo el que presenta el mayor aporte de vapor de agua a la atmósfera por la transpiración, respectivamente en este mes la E presenta la menor fracción.

Para la cuenca de San Carlos el flujo de agua verde es de 76%, mientras que el flujo azul es del 24% con una desviación estándar de 9%. Hölscher y Ammer (2010) estudiando plantaciones forestales y monocultivos de Panamá encontraron que la transpiración en la mezcla de especies de árboles tenía una

tasa más alta con respecto a los monocultivos, es decir, del 51% al 56%. Es importante conocer estos resultados ya que en Costa Rica se promueve el pago por servicios ambientales, con la promoción de especies forestales y normalmente las plantan en las cuencas que son las zonas productoras de agua.

Lu *et al.* (2017) realizó la partición de la evapotranspiración con isótopos estables del agua en un sistema productivo en el cual implementó riego y observó que $46\% \pm 5.6\%$ del agua fue utilizada por las plantas para la transpiración y el resto se evaporó directamente del suelo, así mismo encontró que la transpiración aumentó conforme el cultivo tuvo el desarrollo. Es impórtate relacionar estos resultados con la cuenca San Carlos, ya que por lo general las cuencas contienen superficies con sistemas de cultivo y probablemente las áreas con cultivos presenten más evaporación ya que no permiten más competencia de especies vegetales y los suelos por lo general están desnudos. Por otra parte, al utilizar sistema de riego en la misma agua de cuenca el uso de isótopos es una alternativa para obtener datos fiables para monitorear la dinámica del flujo y las pérdidas por el uso de riego en los espacios agrícolas y de esta forma encontrar estrategias de gestión del agua dentro de la cuenca (Mahindawansha *et al.* 2019).

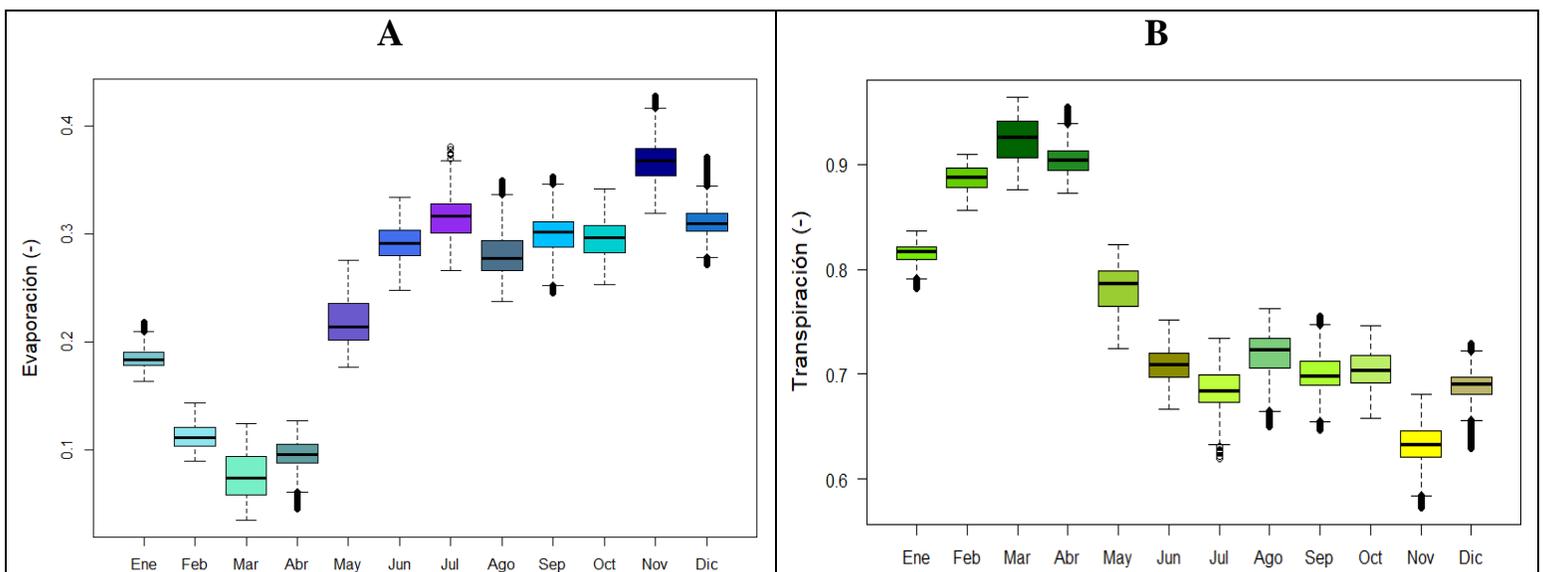


Figura 22. A) Fracción de la E/ET y B) Fracción de la T/ET en la cuenca del río San Carlos, Costa Rica

3.3 Fracción de precipitación por la transpiración

El fraccionamiento de la precipitación por el proceso de transpiración en la cobertura vegetal se observa que está estrechamente relacionado con la temperatura y humedad relativa, es decir, mayor temperatura menor cantidad de volumen de agua en la atmósfera, esto provoca una mayor transpiración en las hojas de los árboles. Se puede observar que los meses donde la temperatura es baja la humedad relativa aumenta y la fracción de la precipitación disminuye (figura 23). Así lo menciona Torres Sánchez (2017) que la transpiración no es solo cuestión de la temperatura, sino que también de la humedad relativa.

La temperatura y la humedad relativa juegan un papel importante en el vapor de agua proveniente de la transpiración, ya que en los primeros cuatro meses del año se observa que la transpiración utiliza mayor agua de la lluvia, específicamente estos meses corresponden a la época seca, podría decirse que gran parte de la lluvia es utilizada por las plantas, caso contrario en los meses cuando sucede la época lluviosa las plantas siguen utilizando agua pero la fracción por la transpiración es menor, según los resultados observados en los meses con mayor promedio de precipitación existe menor participación. Así lo menciona López *et al.* (2012) con mayor humedad en las hojas y menor radiación la transpiración suele a disminuir.

Meinzer *et al.* (2004) consideran que los cambios dinámicos que se presentan en la transpiración por los cambios ocurridos en la exposición o radiación son independientes del tamaño de la cobertura vegetal, uso de agua por la misma y la capacidad de almacenamiento de agua. Mientras que, Motzer *et al.* (2005) mencionan que la transpiración tiene un comportamiento diferente en los estratos del dosel del bosque y que se encuentra limitada por el déficit de presión de vapor, aun cuando el agua en el suelo no es limitada. Considerando las dos observaciones anteriores se puede decir que el comportamiento mostrado en la transpiración de la cuenca San Carlos es normal y que un estudio de manera puntual en los diferentes estratos de la vegetación permitiría comprobar si existen cambios en la transpiración.

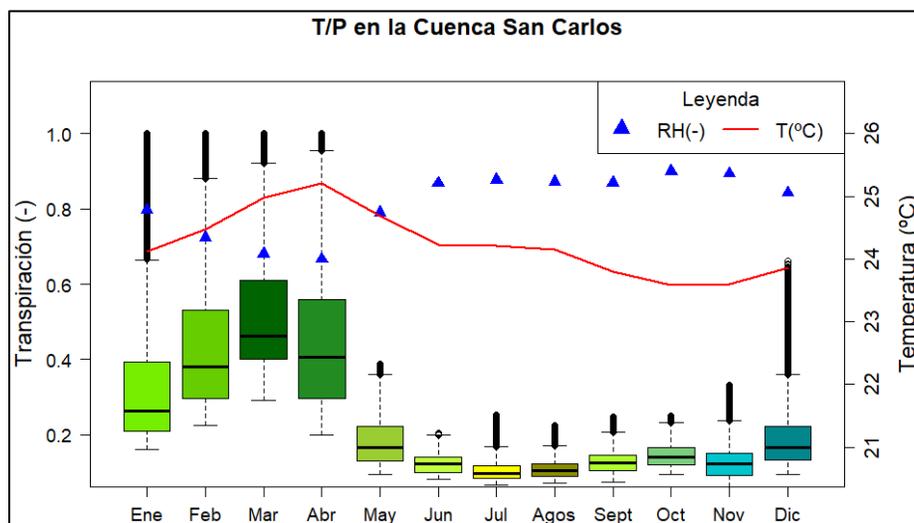


Figura 23. Fracción de la transpiración de la precipitación mensual de la cuenca San Carlos, Costa Rica

3.4 Pérdida de agua en el balance hidrológico de la cuenca San Carlos

Se considera la cuenca como unidad de planificación para el aprovechamiento y conservación del recurso hídrico, principalmente para mantener la calidad y cantidad, para satisfacer las demandas de la sociedad y otros procesos que demandan los ecosistemas naturales (Zaldívar Larraín 2017). La cuenca San Carlos presenta pérdida de agua por tres procesos interceptación, evaporación y transpiración, siendo este último el que más representa valores altos que van desde 79 hasta 130 mm, mientras que la evaporación va desde 10 hasta 35 mm y la interceptación de 15 a 38 mm (figura 24).

El 17% de la pérdida de agua en la cuenca San Carlos es explicada por la transpiración, el 5% para la evaporación y también para la intercepción. El otro porcentaje podría ser posible que se distribuya en la infiltración a las aguas subterráneas. Según Huss *et al* (2017) a nivel global en los próximos años se cree que pueda existir un posible aumento en las temperaturas, pero no se sabe a ciencia cierta cuanto puede significar ese aumento, y se espera un patrón inestable en la precipitación, esto puede significar cambios en los flujos de agua del balance hidrológico, ya que la precipitación es la principal entrada.

De acuerdo, con los resultados obtenidos de la pérdida de agua en la cuenca podemos decir que aproximadamente en total se pierde el 27% de la precipitación en procesos de transpiración, evaporación e intercepción, entonces, esto indica que en 73% de lluvia se queda en la cuenca, conociendo estos datos se pueden establecer medidas o estrategias para aprovechar de manera adecuada ese 73%, en otras palabras, la gestión del recurso hídrico de la cuenca se debe planificar en base a ese porcentaje, de esta forma se garantiza el aprovechamiento eficiente del recurso hídrico, sin comprometer el funcionamiento adecuado de los ecosistemas tanto productivos como forestales, por lo tanto, estaríamos haciendo uso racional del recurso, y tendríamos posibles soluciones para posibles cambios en el tiempo, debido a la problemática del cambio climático.

Por lo antes mencionado la cuantificación y monitoreo de los flujos de agua es muy fiable y brinda información valiosa para los tomadores de decisiones en el ámbito político, pueden generar o establecer políticas y estrategias para el manejo y gestión integrada de los recursos hídricos ya sea a escala nacional o local. Las investigaciones con datos isotópicos permiten tener un conocimiento holístico para comprender la relación entre el cambio climático, la vegetación y actividades antropogénicas en cuanto al uso y disponibilidad del recurso hídrico, principalmente en la ET que es un proceso natural y que siempre va a existir pero que lo podemos manejar si conocemos su comportamiento en sus distintos componentes en especial los flujos verde y azul.

Por eso una de las mejores alternativas es planificar el recurso hídrico desde el enfoque de cuencas porque agrupa de manera holística las actividades de los seres humanos y los procesos naturales. Se sabe que la gestión integrada del recurso hídrico permite conectar los diferentes sectores y actores que son fundamentales para la planificación adecuada del recurso hídrico ante las problemáticas de origen antropogénico y de los posibles escenarios que se podría generar por el cambio climático.

De esta manera, podremos conocer sobre los cambios que se puedan originar en los flujos del agua principalmente en la recarga de los acuíferos, conexiones entre las aguas subterráneas, mezcla de aguas de distintos orígenes y la posible vulnerabilidad que el recurso agua puede enfrentar en el entorno geográfico de la cuenca. Mencionando que la hidrología isotópica permite obtener datos de todos los procesos, alteración o cambios que el agua puede tener en el ciclo hidrológico

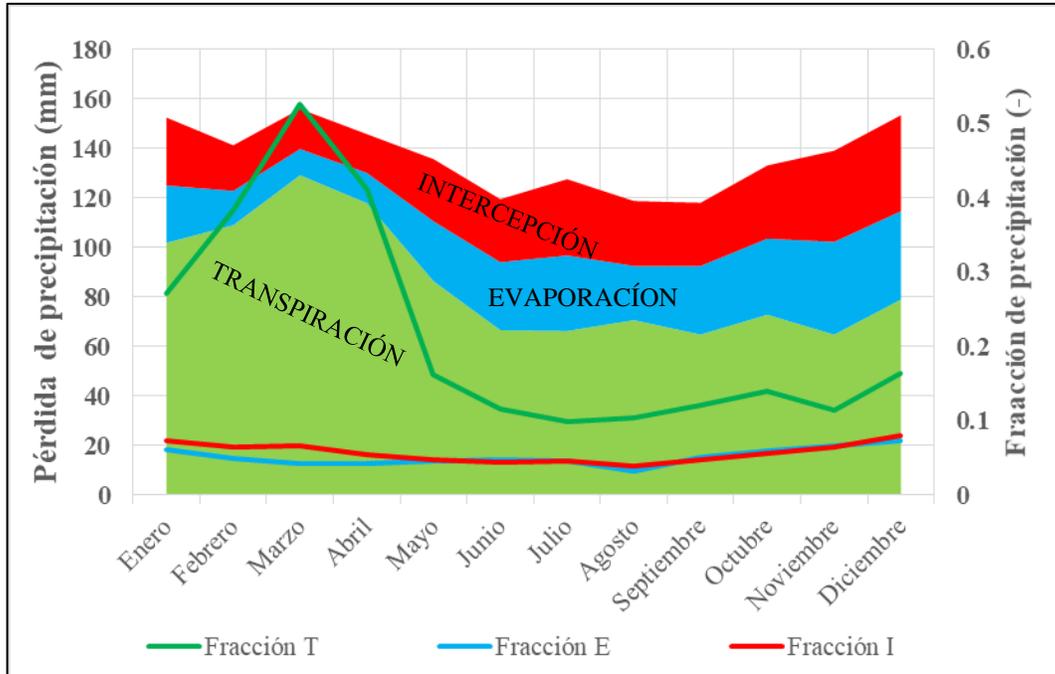


Figura 24. Pérdida de agua en la cuenca San Carlos por Transpiración, Evaporación e Intercepción.

Por otra parte, tenemos que el fraccionamiento de la precipitación de la cuenca del río San Carlos, se debe a tres procesos la transpiración, evaporación e intercepción. Al comparar los tres procesos encontramos que la transpiración es la que realiza mayor fraccionamiento en la precipitación y lo hace en los meses de enero a mayo luego se mantiene casi constante, y en el mes de diciembre tiene un pequeño aumento. Los otros dos procesos presentan un fraccionamiento similar durante el año, es decir a lo largo de los 12 meses. Entre los meses de marzo y abril, la transpiración representa aproximadamente entre el 0.4 y 0.5 del fraccionamiento de la precipitación, mientras que la evaporación e intercepción solo el 0.04 y 0.06 (figura24).

4. CONCLUSIONES

El flujo de agua verde en la cuenca del río San Carlos representa el 76% de vapor de agua en la evapotranspiración, y el 24% para el flujo azul, dentro del área de la cuenca existe un patrón de transpiración durante los meses del año, y está delimitado por las dos épocas que existen en Costa Rica, es decir, en los meses que inicia la época de lluvia la transpiración disminuye, y, en los meses de la época seca tiende a aumentar, siendo marzo el mes con mayor promedio de transpiración.

La época seca marca un acontecimiento importante para la cuenca ya que la mayor parte de la precipitación es utilizada por la vegetación en el proceso de la transpiración, esto se relaciona con los valores más altos de temperatura en los meses más secos y los valores de la humedad relativa más bajos.

La pérdida de agua para la cuenca se ve determinada por la transpiración siendo esta de 17%, 5% para la evaporación y 5% para intercepción, con estos hallazgos podemos determinar el nivel de importancia que tiene el proceso de la transpiración en el uso del agua en el ciclo hidrológico.

La hidrología isotópica permite la cuantificación y monitoreo de los flujos de agua, brinda información factible y valiosa para que los tomadores de decisiones en el ámbito político puedan establecer políticas y estrategias para el manejo y gestión integrada de los recursos hídricos. Respalda un conocimiento holístico para comprender la relación o conexión entre el cambio climático, vegetación y actividades antropogénicas en cuanto al uso y disponibilidad del recurso hídrico.

La aplicación del modelo isotópico en escalas de tiempo como los meses brinda un panorama más claro del movimiento de los flujos, se puede observar con mayor claridad las variables climáticas que varían y generan un cambio en los flujos y procesos del ciclo hidrológico.

La hidrología isotópica utiliza los isótopos estables de agua: deuterio y oxígeno 18 ($\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$) como trazadores naturales para obtener información de las cuencas como: cuantificación de flujos de agua (transpiración y evaporación), conexión entre agua, suelo, planta y atmósfera, recarga de los acuíferos, identificación de la conexión entre las aguas subterráneas, generación de escorrentía y erosión del suelo, disponibilidad y calidad de agua, y para rastrear el origen de la contaminación del agua. De igual forma, permite la proyección del recurso hídrico frente a escenarios de variabilidad climática, mediante la incorporación de patrones climáticos locales en sus procesos.

Tomando en consideración la información que se genera con la hidrología isotópica, podemos determinar la contribución en el manejo y gestión de cuencas, para potenciar el proceso de diagnóstico, ya que permite cuantificar entradas y salidas de los flujos de agua, su interrelación con todos los componentes biofísicos del ecosistema (bosque, suelo, atmósfera y otros) brindando un claro panorama de la situación y condiciones para realizar la planificación y zonificación. Además, proporciona insumos claves como pérdida, disponibilidad y uso del recurso hídrico en los diferentes procesos y actividades (naturales y antropogénicas), también, permite la toma de decisión y creación de políticas dentro del plan de manejo para garantizar la disponibilidad del agua, tanto en época seca como lluviosa. En otras palabras, la hidrología isotópica se puede acoplar en la mayor parte de las fases de gestión de cuencas, porque permite la cuantificación, planificación, proyección y monitoreo del recurso hídrico.

5. RECOMENDACIONES

La hidrología isotópica es una herramienta útil y viable en la gestión integrada del recurso hídrico en cuencas hidrográficas debido a que permite cuantificar los flujos de agua que ingresan al sistema, la tasa de transpiración en especies forestales y descifrar la interrelación entre la profundidad de raíces y el acceso al agua, en pro de identificar especies forestales con mayor potencial de resiliencia ante estrés hídrico. Esto puede facilitar el diseño y planificación territorial que consideren procesos de reforestación,

restauración ecológica y establecimiento de sistemas agroforestales orientados a lograr una mayor eficiencia hídrica.

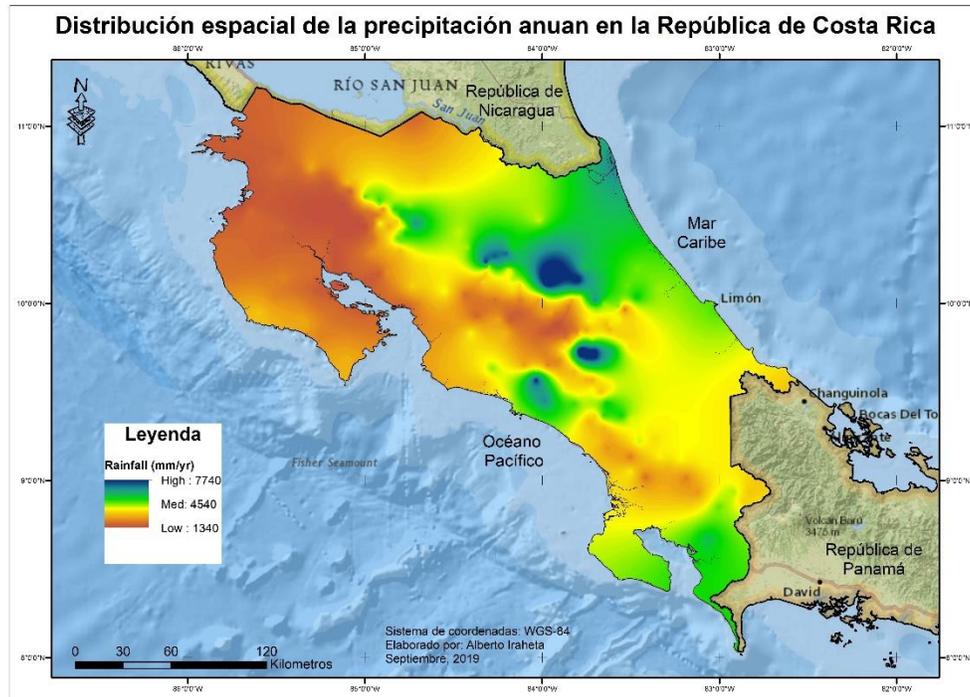
6. LITERATURA CITADA

- Barbeta, A; Peñuelas, J. 2017. Relative contribution of groundwater to plant transpiration estimated with stable isotopes. *Scientific Reports* 7(1):1-10.
- Benettin, P; Volkmann, THM; Von Freyberg, J; Frentress, J; Penna, D; Dawson, TE; Kirchner, JW. 2018. Effects of climatic seasonality on the isotopic composition of evaporating soil waters.
- Dubbert, M; Cuntz, M; Piayda, A; Maguás, C; Werner, C. 2013. Partitioning evapotranspiration - Testing the Craig and Gordon model with field measurements of oxygen isotope ratios of evaporative fluxes. (en línea). *Journal of Hydrology* 496:142-153. Disponible en <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.05.033>
- Hölscher, D; Ammer, D. 2010. Tree transpiration in forest plantations: effects of species, seasonality and diversity (Panamá) en línea. Consultado 18 jul. 2018. Disponible en: <https://ediss.uni-goettingen.de/bitstream/handle/11858/00-1735-0000-0006-B132-0/kunert.pdf?sequence=1>
- Hu, H; Chen, L; Liu, H; Khan, MYA; Tie, Q; Zhang, X; Tian, F. 2018. Comparison of the vegetation effect on ET partitioning based on eddy covariance method at five different sites of Northern China. *Remote Sensing* 10(11): s.p.
- Huss, M; Bookhagen, B; Huggel, C; Jacobsen, D; Bradley, RS; Clague, JJ; Vuille, M; Buytaert, W; Cayan, DR; Greenwood, G; Mark, BG; Milner, AM; Weingartner, R; Winder, M. 2017. Toward mountains without permanent snow and ice, *Earth's Future*, 5, 418–435, doi:10.1002/2016EF000514.
- López-López, R; Ojeda-Bustamante, W; López Andrade, AP; catalán-Valencia, EA. 2012. Heat Pulse Method and Sap Flow for Measuring Transpiration in Cacao. *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas XII* (2):85-96. en línea. Consultado 16 de jul. 2018. Disponible en: <https://pdfs.semanticscholar.org/fbba/aba46f18f788c3a734e3249ab5a9df707cde.pdf>
- Lu, X; Liang, LL; Wang, L; Jenerette, GD; McCabe, MF; Grantz, DA. 2017. Partitioning of evapotranspiration using a stable isotope technique in an arid and high temperature agricultural production system. *Agricultural Water Management*, 179, 103–109. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.08.012>
- Mahindawansa, A; Külls, C; Kraft, P; Breuer, L. 2019. Estimating water flux and evaporation losses using stable isotopes of soil water from irrigated agricultural crops in tropical humid regions. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions* (June):1-28.
- Meinzer, FC; James, SA; Goldstein, G. 2004. Dynamics of transpiration, sap flow and use of stored water in tropical forest canopy trees. *Tree Physiology* (2003):901-909.
- Meißner, M; Köhler, M; Schwendenmann, L; Hölscher, D. 2012. Partitioning of soil water among canopy trees during a soil desiccation period in a temperate mixed forest. *Biogeosciences* 9(8):3465-3474.

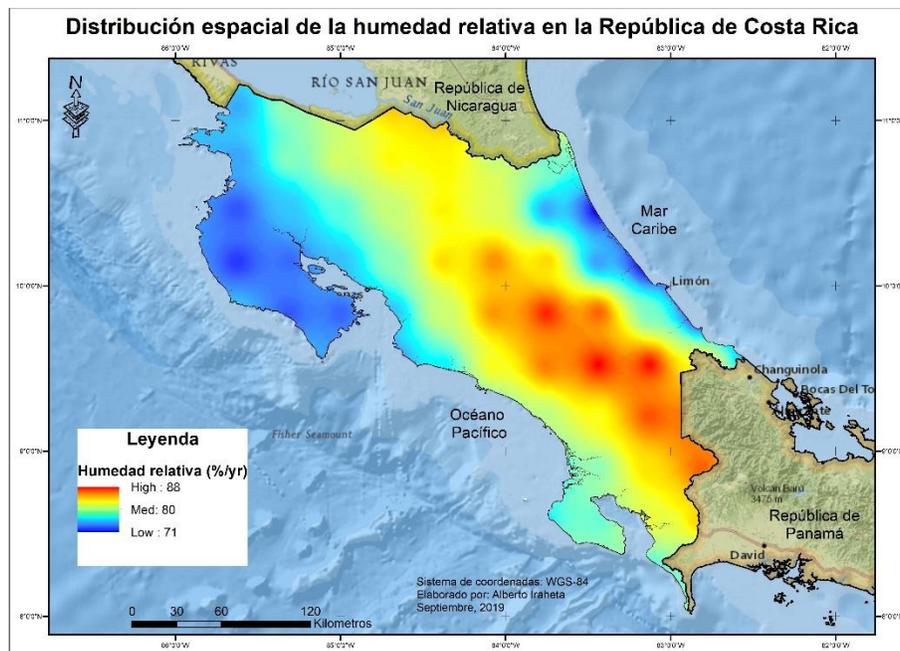
- Motzer, T; Anhuf, D; Schmitt, D; Munz, N; Koppers, M. 2005. Stomatal conductance, transpiration and sap flow of tropical montane rain forest trees in the southern Ecuadorian Andes. *Tree Physiology* 25(10):1283-1293.
- Sprenger, M; Tetzlaff, D; Soulsby, C. 2017. Soil water stable isotopes reveal evaporation dynamics at the soil-plant-atmosphere interface of the critical zone. *Hydrology and Earth System Sciences* 21(7):3839-3856.
- Squeo, F; León, M. 2007. Capítulo III Transpiración. *Fisiología Vegetal*: 67-84. en línea. Consultado 17 jul. 2018. Disponible en <http://exa.unne.edu.ar/biologia/fisiologia.vegetal/Transpiracion.pdf>
- Torres Sánchez, JR. 2017. Construcción y Calibración de Sensores para la medición del Flujo de Savia en el cálculo de la Transpiración mediante el Método HRM. Tesis de maestría. Universidad Politécnica de Valencia. en línea. Consultada el 18 jul. 2018. Disponible en: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/92623/TORRES%20-%20Construcci%C3%B3n%20y%20calibraci%C3%B3n%20de%20sensores%20para%20la%20medici%C3%B3n%20del%20flujo%20de%20savia%20en%20el%20c%C3%A1lculo....pdf?sequence=1>
- Welp, LR; Lee, X; Kim, K; Griffis, TJ; Billmark, KA; Baker, JM. 2008. $\delta^{18}\text{O}$ of water vapour, evapotranspiration and the sites of leaf water evaporation in a soybean canopy. *Plant, Cell and Environment* 31(9):1214-1228.
- Zaldívar Larraín, JP. 2017. La cuenca hidrográfica como propuesta de unidad de análisis y gestión sustentable del territorio. Caso de estudio cuencas de los ríos Limarí y Rapel a partir de la información del VII Censo Nacional Agropecuario de análisis y gestión sustentable. Tesis de maestría. Universidad de Chile. 179p. en línea. Consultado el 19 jul. 2018. Disponible en: <http://mgpa.forestaluchile.cl/Tesis/Zaldivar%20Juan%20Pablo.pdf>

ANEXOS

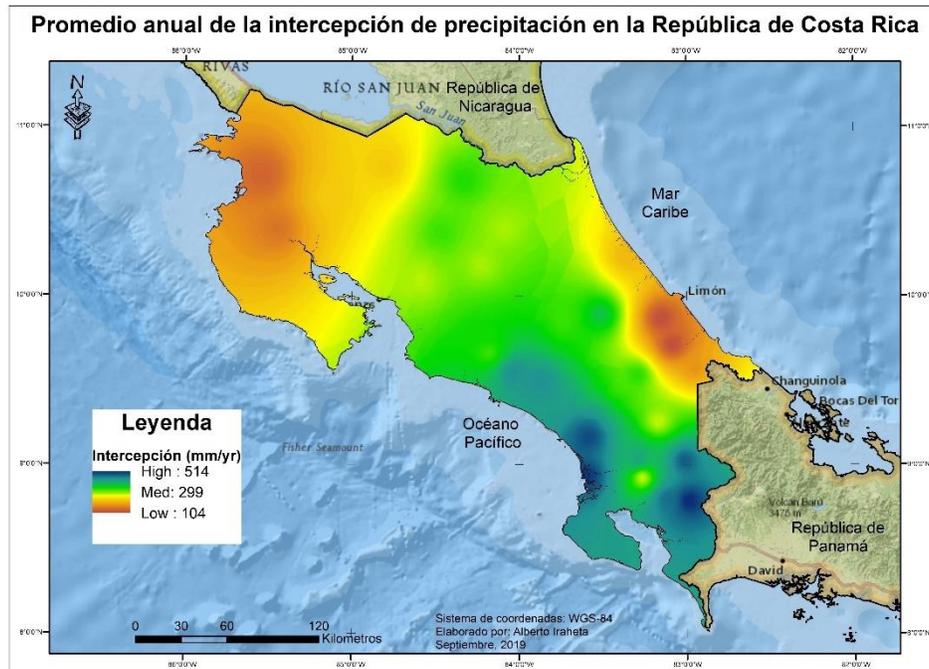
Anexo 1. Distribución de la precipitación en promedio anual utilizado en el balance de masa para obtener la transpiración de Costa Rica.



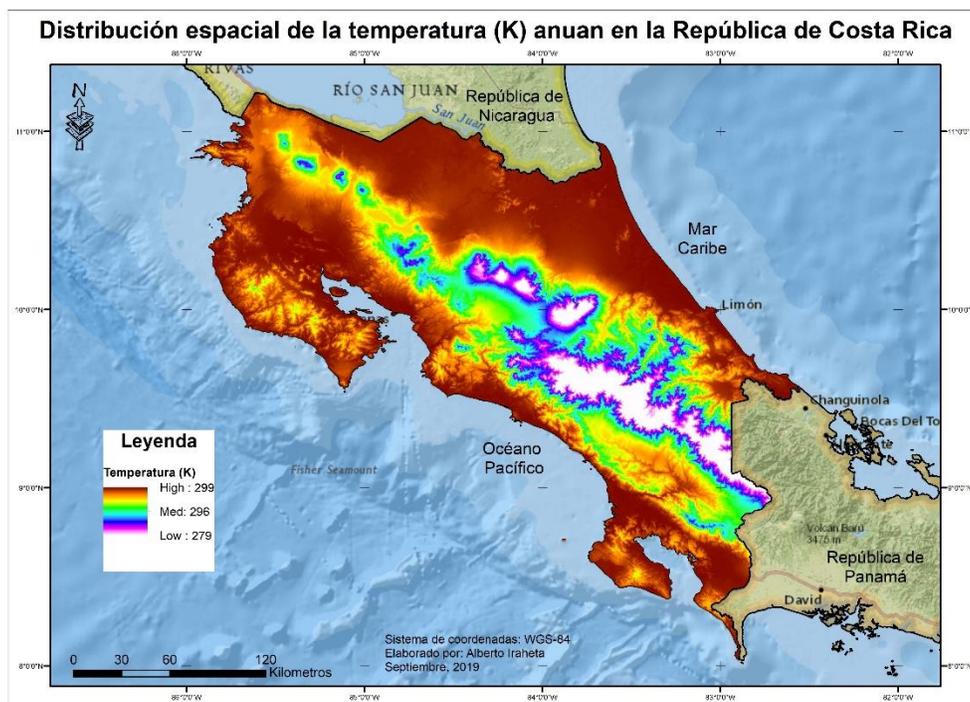
Anexo 2. Humedad relativa en promedio anual utilizado en el balance de masa para obtener la transpiración de Costa Rica.



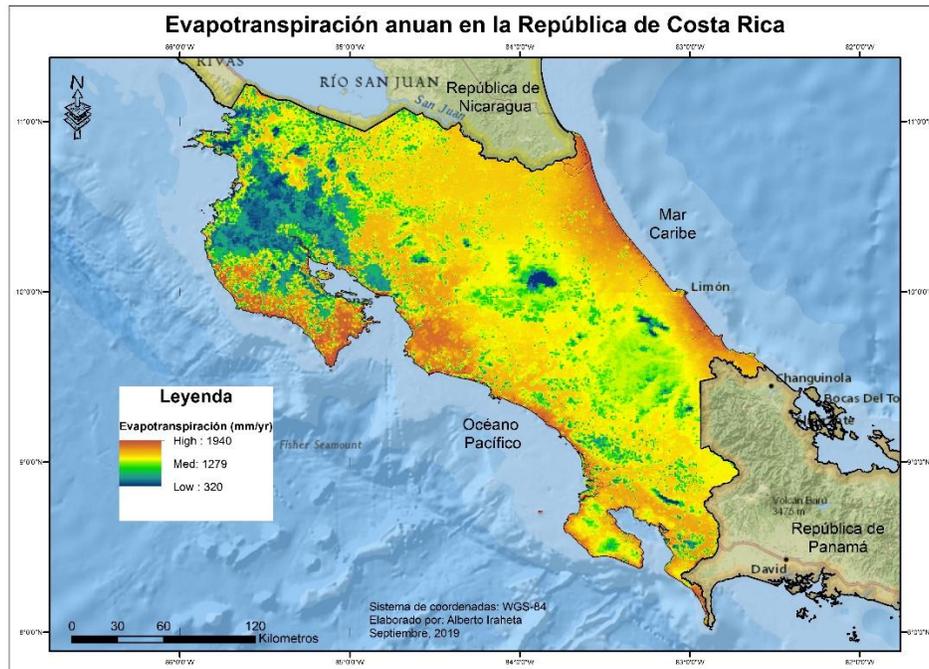
Anexo 3. Intercepción de la precipitación de Costa Rica en promedio anual, utilizado en el balance de masa para obtener la transpiración.



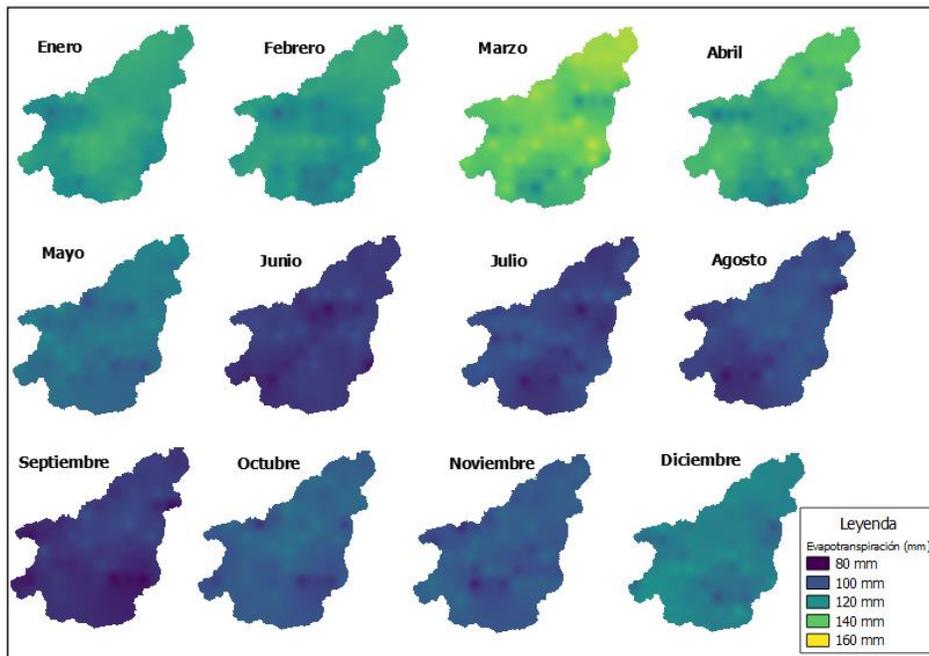
Anexo 4. Temperatura (K) en promedio anual para Costa Rica, utilizada en el balance de masa para obtener la transpiración de Costa Rica.



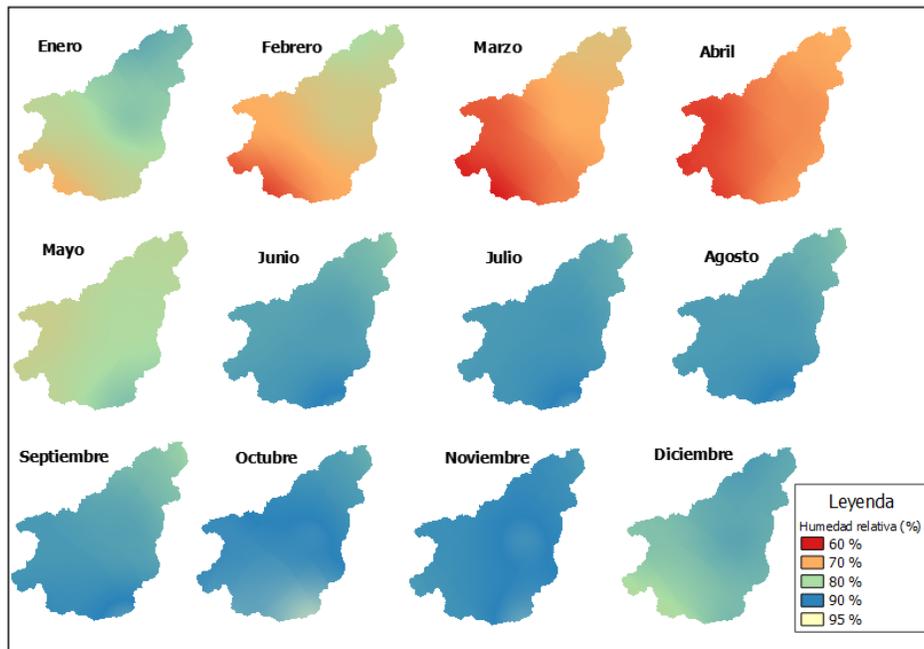
Anexo 5. Evapotranspiración anual de Costa Rica, utilizada en el proceso de fraccionamiento de los flujos de agua azul y verde.



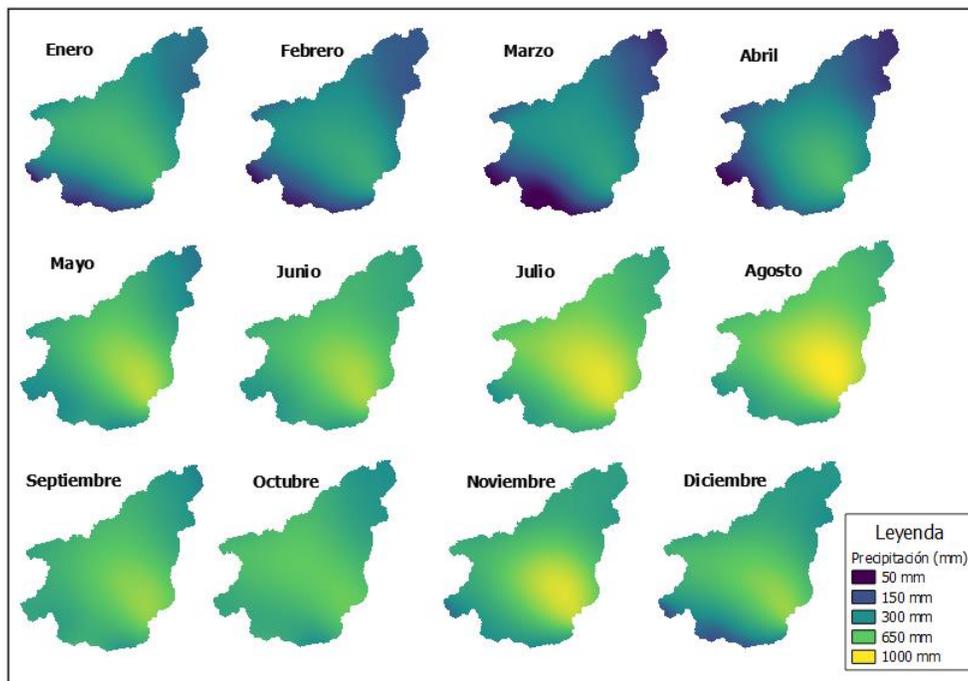
Anexo 6. Evapotranspiración mensual de la cuenca del río San Carlos, utilizada en el proceso de fraccionamiento de los flujos de agua azul y verde de la cuenca.



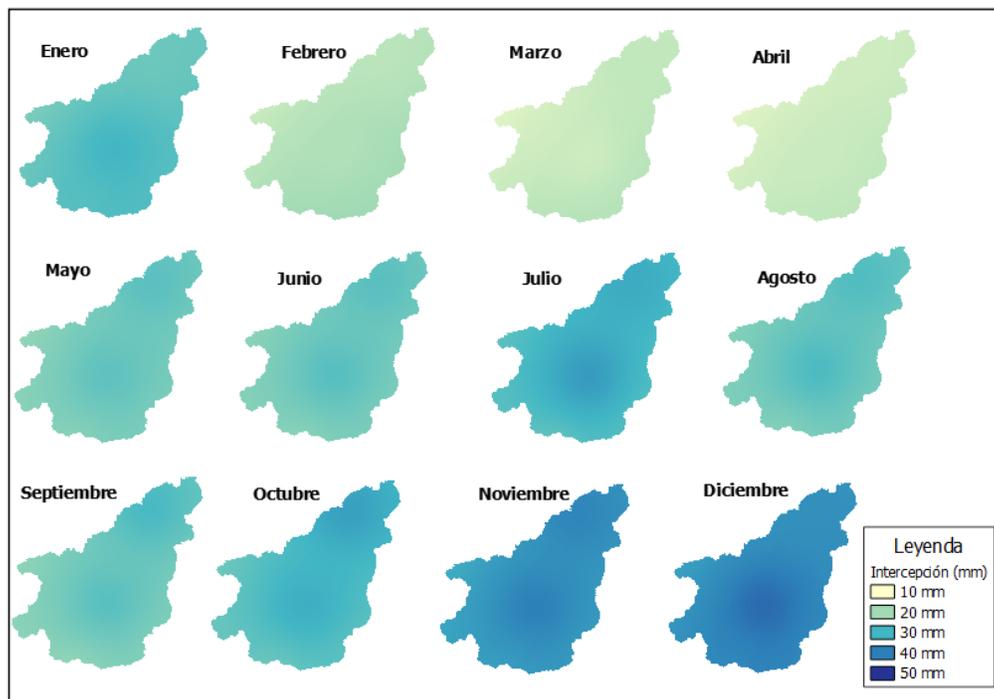
Anexo 7. Humedad relativa mensual de la cuenca del río San Carlos, utilizada en el proceso de partición de la transpiración.



Anexo 8. Precipitación mensual de la cuenca del río San Carlos, utilizada en el proceso de partición de la transpiración.



Anexo 9. Intercepción de la precipitación mensual de la cuenca del río San Carlos, utilizada en el proceso de partición de la transpiración.



Anexo 10. Temperatura mensual de la cuenca del río San Carlos, utilizada en el proceso de partición de la transpiración.

