



UNIVERSIDAD DE CUENCA
Facultad de Ciencias Químicas
Carrera de Ingeniería Ambiental

“Conceptualización de procesos de generación de escorrentía mediante el uso de trazadores ambientales en cuencas de páramo a meso-escala del río Quinuas”.

*Trabajo de titulación previo la obtención
del título de Ingeniera Ambiental.*

Autora:

Carolina Elizabeth Plaza Trujillo

CI. 0105381362

Tutor:

Ing. Patricio Javier Crespo Sánchez, PhD.

CI. 0102572773

Asesor:

Ing. Patricio Xavier Lazo Jara, MSc

CI. 0104443966

Cuenca – Ecuador

20 de mayo de 2019

RESUMEN

Los páramos juegan un rol fundamental en el abastecimiento del recurso hídrico para los valles interandinos, cubriendo la demanda del sector doméstico, industrial y energético. No obstante, la exigencia de agua genera una presión negativa sobre el ecosistema, afectando su tasa de regeneración. Identificar las principales fuentes de escorrentía dentro de un sistema hidrológico permite enfocar esfuerzos y recursos para la conservación de estos puntos y a su vez asegurar la provisión de agua. Consecuentemente, el presente estudio determinó cómo el régimen de precipitación y características geomorfológicas dentro de la cuenca del río Quinuas (91.3 Km²), ubicado en el Parque Nacional Cajas, influyen su funcionamiento hidrológico. El uso de trazadores conservativos ($\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$), permitieron comprender la dinámica hidrogeoecológica de las cuencas hidrográficas y al ser combinados con funciones de transferencia, estimaron los tiempos de tránsito promedio (MTT) y definieron los procesos de mezcla del flujo a nivel interno. Así, se obtuvo como resultado que la precipitación que ingresa al sistema se combina con el agua almacenada en los suelos y desemboca en los caudales. Consecuente a este efecto, se determinó que las lagunas influyen en el tiempo de tránsito del agua, al igual que la topografía que conforma el terreno permite la generación de escorrentía a través de las capas superficiales de los andosoles, definiendo la dinámica entre los factores externos (paisaje) e internos (procesos de mezcla), lográndose una conceptualización real para la cuenca estudiada.

Palabras clave: Isótopos estables. Páramo andino. Tiempos de tránsito. Modelación hidrológica. Oxígeno-18.

ABSTRACT

The Andean paramo ecosystem plays a fundamental role in the supply of water resources for the inter-Andean valleys since it covers the demand of the domestic, industrial and energetic sectors. As a result, the water requirement generates negative pressure on the ecosystem, affecting its regeneration rate. Identifying the main sources of runoff within a hydrological system allows to focus efforts and resources for the conservation of these points. In return, it ensures the provision of water. The following study has determined how the precipitation regime and geomorphological characteristics within the Quinuas River basin (91.3 Km²), located in the Cajas National Park, influence its hydrological functioning. The use of conservative tracers allowed the understanding of the hidrogeoecological dynamics of watersheds, and when combined with transfer functions, they estimated mean transit times (MTT) and defined the processes of mixing flow on internal levels. Thus, it was obtained as a result that the precipitation that enters the system is combined with the water stored in the soils and flows into the exit of the basins. Consequently, it was determined that the lagoons are influential in transit time of the water. Finally, the topography that makes up the terrain allows the generation of runoff through the superficial layers of the andosols, defining the dynamics between the external factors (landscape) and internal factors (mixing processes), achieving a real conceptualization for the studied catchment area.

Keywords: Stable isotopes. Andean paramo. Transit times. Hydrologic modeling. Oxygen-18.



CONTENIDO

RESUMEN.....	2
ABSTRACT	3
1. INTRODUCCIÓN.....	13
2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	16
2.1. Descripción del área de estudio.....	16
2.2. Monitoreo y Análisis.....	19
2.2.1. Recolección de datos isotópicos.....	19
2.2.2. Análisis de laboratorio de concentraciones isotópicas	20
2.2.3. Análisis isotópico de la variabilidad temporal.....	20
2.2.4. Estimación de tiempos de tránsito	21
2.2.4.1. Determinación de función de entrada	21
2.2.4.2. Corrección de la función de entrada	21
2.2.4.3. Funciones de transferencia.....	22
2.2.4.4. Relación entre características de paisaje y tiempos de tránsito promedio	25
2.2.5. Conceptualización del modelo hidrológico	25
3. RESULTADOS	26
3.1. Composición isotópica en precipitación	26
3.2. Composición isotópica en el caudal.....	29
3.3. COMPOSICIÓN ISOTÓPICA EN MANANTIALES.....	32
3.4. Composición isotópica en lagunas.....	33
3.5. Composición isotópica en transectos.....	35
3.5.1. Precipitación vs pajonal.....	35
3.5.1.1. Pajonal Alto	35



3.5.1.2.	Pajonal Medio.....	36
3.5.1.3.	Pajonal Bajo	36
3.5.2.	Precipitación vs bosque de polylepis	37
3.5.2.1.	Bosque de polylepis alto.....	37
3.5.2.2.	Bosque de Polylepis Medio.....	38
3.5.2.3.	Bosque de Polylepis Bajo	38
3.5.3.	Precipitación vs bosque de pino	39
3.5.3.1.	Bosque de pino alto.....	39
3.5.3.2.	Bosque de Pino Medio.....	40
3.5.4.	Precipitación vs pasto.....	40
3.6.	Tiempo de tránsito promedio dentro de las cuencas monitoreadas	41
3.6.1.	Caudales	41
3.6.2.	Lagunas.....	46
3.6.3.	Relación cobertura-tiempos de tránsito.....	47
4.	DISCUSIÓN.....	51
4.1.	Caracterización espacial y temporal de la señal isotópica	51
4.1.1.	Precipitación	51
4.1.2.	Caudales	52
4.1.3.	Manantiales	52
4.1.4.	Transectos.....	53
4.1.5.	Lagunas.....	53
4.2.	Tiempos de tránsito promedios.....	54
4.3.	Conceptualización del funcionamiento hidrológico.....	55
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	57
6.	BIBLIOGRAFÍA.....	58
	ANEXOS.....	64
	ANEXO I.	64

ANEXO II	66
ANEXO III.	68

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Caracterización de las propiedades físicas de la cuenca de estudio.	18
Tabla 2: Modelos de parámetros agrupados para la determinación de tiempos de tránsito promedios.	24
Tabla 3: Descripción de la variación de $\delta^{18}\text{O}$ para cada uno de los puntos monitoreados a lo largo de la zona de estudio	27
Tabla 4: Tiempos de tránsito promedios obtenidos mediante la aplicación de modelos de convolución agrupados a QQ12 con sus respectivos coeficientes de eficiencia.....	41
Tabla 5: Tiempos de tránsito promedios de cada una de las cuencas monitoreadas, incluyendo 2 lagunas que conforman la cuenca del río Quinuas.....	44
Tabla 6: Coeficientes de correlación entre MTT y cobertura vegetal.	47
Tabla 8: Coeficientes de correlación	49

INDICE DE FIGURAS

Figura 1: a) Localización geográfica de la cuenca del río Quinuas en Ecuador, b) Mapa de elevación y puntos de monitoreo dentro de la zona de estudio, c) Mapa de distribución de cobertura vegetal que conforma el área.	17
Figura 2: a) Relación entre $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ de muestras de precipitación (LMWL) correspondientes al periodo abril 2014-abril 2017, b) Comparación de LMWL con caudales, lagunas y manantiales	26
Figura 3: Influencia del efecto altitudinal en la concentración isotópica.....	28
Figura 4: Cantidad de precipitación mensual vs concentración isotópica ($\delta^{18}\text{O}$) durante el periodo abril 2014-abril 2015	29
Figura 5: Serie de tiempo de los 5 puntos de caudal monitoreados en conjunto con el promedio de la señal isotópica de los 3 puntos de precipitación, para los periodos abril 2014-abril 2018.....	30
Figura 6: Comparación de LMWL y relación de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ de caudales monitoreados, a) Virgen del Cajas, b) QQ12, c) Chirimachay, d) Matadero, e) Dos Chorreras.....	31

Figura 7: Serie de tiempo de los 4 puntos de manantiales monitoreados en conjunto con el promedio de la señal isotópica de los 3 puntos de precipitación, para el periodo junio 2014-junio 2018.....	32
Figura 8: Comparación de LMWL y relación de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ de manantiales monitoreados, a) Manantial dentro de la cuenca 1, b) Manantial dentro de la cuenca 2, c) Manantial dentro de la cuenca 2, d) Manantial dentro de la cuenca 4.	33
Figura 9: Serie de tiempo de las 2 lagunas monitoreados en conjunto con el promedio de la señal isotópica de los 3 puntos de precipitación.....	34
Figura 10: Comparación de LMWL y relación de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ de lagunas monitoreadas, a) Laguna Toreadora entrada y salida b) Laguna Caballo Shayana.....	34
Figura 11: a) Serie de tiempo de Parte Alta del Transecto 1 a 3 profundidades distintas, b) Comparación de LMWL y relación de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ de las 3 profundidades analizadas.....	35
Figura 12: a) Serie de tiempo de Parte Media del Transecto 1 a 3 profundidades distintas, b) Comparación de LMWL y relación de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ de las 3 profundidades analizadas. .	36
Figura 13: a) Serie de tiempo de Parte Media del Transecto 1 a 3 profundidades distintas, b) Comparación de LMWL y relación de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ de las 3 profundidades analizadas. .	37
Figura 14: a) Serie de tiempo de Parte Alta del Transecto 2 a 3 profundidades distintas, b) Comparación de LMWL y relación de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ de las 3 profundidades analizadas.....	37
Figura 15: a) Serie de tiempo de Parte Media del Transecto 2 a 3 profundidades distintas, b) Comparación de LMWL y relación de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ de las 3 profundidades analizadas. .	38
Figura 16: a) Serie de tiempo de Parte Baja del Transecto 2 a 3 profundidades distintas, b) Comparación de LMWL y relación de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ de las 3 profundidades analizadas. .	39
Figura 17: a) Serie de tiempo de Parte Alta del Transecto 3 a 3 profundidades distintas, b) Comparación de LMWL y relación de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ de las 3 profundidades analizadas.....	39
Figura 18: a) Serie de tiempo de Parte Media Alta del Transecto 3 a 3 profundidades distintas, b) Comparación de LMWL y relación de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ de las 3 profundidades analizadas.	40
Figura 19: a) Serie de tiempo de Parte Media Baja del Transecto 3 a 3 profundidades distintas, b) Comparación de LMWL y relación de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ de las 3 profundidades analizadas.	41
Figura 20: Simulaciones de tiempos de tránsito promedio para QQ12, a) Modelo Exponencial Pistón, b) Modelo Gamma, c) Modelo de Dispersión, d) Modelo de Dos reservorios paralelos (TPLR)	43



Figura 21: Simulación de tiempos de tránsito promedio con coeficiente de eficiencia respectivo, a) QQ12, b) Virgen del Cajas, c) Chirimachay, d) Matadero, e) Dos Chorreras	46
Figura 22: Simulación de tiempos de tránsito promedio con coeficiente de eficiencia respectivo para lagunas, a) Laguna Toreadora, b) Laguna Caballo Shayana.	47
Figura 23: Correlación entre MTT y cobertura vegetal	48
Figura 24: Correlación entre área de pendiente y MTT	50
Figura 25: Conceptualización de la cuenca del río Quinuas. H, suelos histosoles; A, suelos andosoles; a y b, horizontes orgánicos; c, horizonte mineral; D, flujo móvil de laguna; Q, caudal.....	56

Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

Carolina Elizabeth Plaza Trujillo en calidad de autora y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "Conceptualización de procesos de generación de escorrentía mediante el uso de trazadores ambientales en cuencas de páramo a meso-escala del río Quinuas", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 20 de mayo de 2019



Carolina Elizabeth Plaza Trujillo
C.I: 0105381362

Cláusula de Propiedad Intelectual

Carolina Elizabeth Plaza Trujillo, autora del trabajo de titulación “Conceptualización de procesos de generación de escorrentía mediante el uso de trazadores ambientales en cuencas de páramo a meso-escala del río Quinuas”, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autora.

Cuenca, 20 de mayo de 2019

A handwritten signature in blue ink, reading "Carolina Plaza", written over a horizontal line.

Carolina Elizabeth Plaza Trujillo
C.I: 0105381362



AGRADECIMIENTOS

Mi más sincera gratitud al Ing. Patricio Crespo, PhD., por su guía y disposición para resolver cualquier inquietud propuesta. Al Ing. Patricio Lazo, MSc., y al Ing. Giovanni Mosquera, PhD (c)., por su tiempo y dirección para llevar a cabo este trabajo de titulación. De la misma manera, quiero dar las gracias al Ing. Darío Zhiña, por la ayuda brindada durante este aprendizaje.

Agradezco al Departamento de Recursos Hídricos y Ciencias Ambientales de la Universidad de Cuenca, de igual manera al proyecto “Desarrollo de indicadores hidrológicos funcionales para la evaluación del impacto del cambio global en ecosistemas Andinos” financiado por la SENESCYT y la DIUC-Universidad de Cuenca.



DEDICATORIA

A mis padres, por su inmenso amor, paciencia y confianza en cada etapa de mi vida. Por su esfuerzo y sacrificio. Por el simple hecho de ser ellos.

A mis hermanas y hermano, por ser mi inspiración y apoyo fundamental. Gracias por cuidarme siempre.

A mis abuelos, por el cariño incuestionable, valores y sabiduría inculcada. En el lugar en el que se encuentren, espero que siempre estén orgullosos de mí.

Carolina Plaza Trujillo

Cuenca, mayo de 2019

1. INTRODUCCIÓN

Los páramos son biomas neotropicales que contribuyen al mantenimiento de importantes funciones ecológicas, así como intervienen en el desarrollo social y económico de los diferentes asentamientos poblacionales (Llambí et al., 2012). Cubren amplias extensiones de terreno de países andinos como Venezuela, Colombia, Perú y Ecuador, siendo la principal fuente de provisión de agua para las ciudades más grandes (Céleri & Feyen, 2009). En Ecuador, aproximadamente el 7% de la superficie del terreno nacional se encuentra cubierto por páramo, pero menos del 40% ha sido declarada como área protegida (Carrillo, Silva, Rollenbeck, Céleri, & Bendix, 2019; Cuesta & De Bievre, 2008). A pesar de los esfuerzos realizados y los recursos invertidos, la alta tasa de crecimiento poblacional nacional, provoca una presión antropogénica significativa en el ecosistema páramo (Hofstede, Coppus, Vásconez, Segarra, & Wolf, 2002; Hofstede, Segarra, & Mena, 2003). Además la expansión agrícola y ganadera, ocasionan una degradación del funcionamiento hidrológico de las cuencas constituyentes (Céleri & Feyen, 2009; Quichimbo et al., 2012).

La demanda doméstica, energética, industrial y agro ganadera proveniente de las grandes ciudades como Quito y Cuenca obliga a captar el recurso hídrico de diferentes ríos regulados por páramos (De Bièvre, Iñiguez, & Buytaert, 2008). De acuerdo con Buytaert et al. (2011), el ecosistema páramo es muy frágil y bajo condiciones que representen una amenaza, pueden desencadenar alteraciones en la dinámica hidrológica del sistema local, razón por la cual, las autoridades competentes se han propuesto proteger estos ecosistemas para garantizar el desarrollo de las actividades antrópicas (Echavarria, 2004). La mayoría de planes y/o programas de manejo de cuencas hidrográficas están basados en investigaciones que describen el comportamiento de los factores determinantes en el páramo, como el régimen de precipitación, radiación, flujo de carbono, cambio de uso de suelo y dinámica de ciertos contaminantes (p.e., Maza, 2016; Muñoz, Céleri, & Feyen, 2016; Musa et al., 2018; Pesántez et al., 2018; Quichimbo et al., 2012). Sin embargo, a pesar de la variedad de estudios existentes, el conocimiento integral del ecosistema aún no es completo. Esto sucede debido a que se omite el comportamiento del flujo durante su trayectoria por los diversos estratos de suelo que existen a lo largo del ecosistema.

Algunas de las investigaciones realizadas en Ecuador han logrado comprender la relación entre los componentes internos y externos de las cuenca y han determinado el rol fundamental de los suelos de páramo en la regulación hídrica, así como el flujo subsuperficial en la generación de escorrentía (Correa et al., 2017; Lazo, Mosquera, McDonnell, & Crespo, 2019; Mosquera, Célleri, et al., 2016; Timbe et al., 2014). Los resultados obtenidos son conseguidos mediante la interpretación de los análisis biogeoquímicos de las concentraciones de isótopos estables del agua, como el oxígeno 18 ($\delta^{18}\text{O}$) y el deuterio ($\delta^2\text{H}$) (Mosquera, Lazo, Cárdenas, & Crespo, 2012).

De acuerdo con Craig, (1961)., el $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$, muestran una colinealidad, por lo que se puede obtener una compresión parcial o total de la dinámica de flujo (Mook, 2002), debido a que su composición se ve afectada únicamente por factores físicos, como evaporación, condensación o mezcla con otras fuentes de agua. Esta particularidad permite identificar variaciones en su concentración en función del tiempo, proporcionando datos sobre el origen, recorrido, distribución del flujo y el tiempo de tránsito a través de la aplicación de diversos métodos de convolución (Capell, Tetzlaff, Hartley, & Soulsby, 2012; Rodgers, Soulsby, Waldron, & Tetzlaff, 2005). Al combinar la información obtenida, ésta puede ser representada mediante un modelo conceptual, capaz de integrar las variables geomorfológicas determinantes para la descripción precisa del funcionamiento hidrológico. Además, la caracterización cualitativa de la cuenca de estudio puede ser complementada y validada con la aplicación previa de modelos de caja negra, debido a que simula y/o predice el comportamiento del flujo en los diferentes estratos edáficos, considerando las funciones de entrada y salida, como precipitación y caudal respectivamente (Maloszewski & Zuber, 1993).

La combinación de la información cuantitativa y cualitativa de lluvia, caudal y de concentración isotópica conllevan a la descripción real del funcionamiento hidrológico, tal es el caso de la cuenca del río Zhuruca (7.53 Km²), en la que se determinó que los suelos histosoles son la principal fuente de escorrentía, por su alta capacidad de retención de agua. Por otro lado, se determinó que dentro del flujo subsuperficial se da una mezcla perfecta que fluye de manera horizontal y vertical a través del horizonte orgánico tardando en salir de la cuenca aproximadamente en 2 meses (Mosquera et al., 2016b; Mosquera et al., 2016c).



Este tipo de información es valiosa para el desarrollo de planes de manejo, conservación y de adaptación al cambio climático, de manera que se pueda alcanzar la sostenibilidad del desarrollo socioeconómico de las poblaciones ligadas a estos ecosistemas por su servicio de aprovisionamiento (Llambí et al., 2012; Sevink, Tonneijck, Kalbitz, & Cammeraat, 2014). Asegurar la persistencia de estos ecosistemas, no solo contribuirá a la dotación continua del recurso hídrico, sino que garantizará el soporte de las funciones ecológicas, por lo que este estudio tiene como objetivo proponer un modelo conceptual de la dinámica hidrogeoquímica del río Quinuas, conformado por un conjunto de potenciales elementos de aporte del sistema, como manantiales, suelos, lagunas y precipitación

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Descripción del área de estudio

El Observatorio Ecohidrológico Quinuas se localiza en la cabecera de la subcuenca del río Tomebamba a 25 km de la ciudad de Cuenca. Se encuentra en un rango altitudinal de 3144 a 4419 m s.n.m (Figura 1), y cubre un área de drenaje de 91,3 km² (Maza, 2016; Pesántez et al., 2018; Saenz, 2015). La cuenca de estudio se ve influenciada por masas de aire continentales derivadas principalmente de la parte amazónica de la cordillera y en menor proporción del aire frío seco de la corriente del Océano Pacífico (Carrillo, Silva, Córdova, Célleri, & Bendix, 2016; Esquivel-Hernández, Mosquera, et al., 2018). Del mismo modo, en la cuenca incide la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), definiéndose dos periodos, como húmedo y seco, los cuales están comprendidos entre los meses de febrero-mayo y junio-septiembre, respectivamente (Padrón et al., 2015). La precipitación media anual se encuentra entre 800mm a 1500mm (Tabla 1), con una temperatura de 5.4°C y una humedad relativa del 92% (Muñoz et al., 2016).

Geológicamente se presentan formaciones como Macuchi y Turi, distribuidas por toda la zona de estudio y confiriendo litología de composiciones basálticas y andesíticas para la primera formación mencionada. Los escarpes existentes son conglomerados de argilitas y areniscas debido a la litología que constituye la formación Turi (Cuenca & César, 2012; Maza, 2016; Palacios, 2017). La zona de estudio presenta configuraciones de valles en forma de U, con pendientes variantes entre 0% a 45%, mientras que sus suelos poseen un alto contenido de materia orgánica que varía desde el 30% al 60% (Tabla 1) (Pesántez et al., 2018). De acuerdo con la clasificación de suelos establecidos por la FAO, la cuenca del río Quinuas posee una predominancia de dos tipos de suelos, tales como, Andosoles e Histosoles (Carrillo et al., 2016).

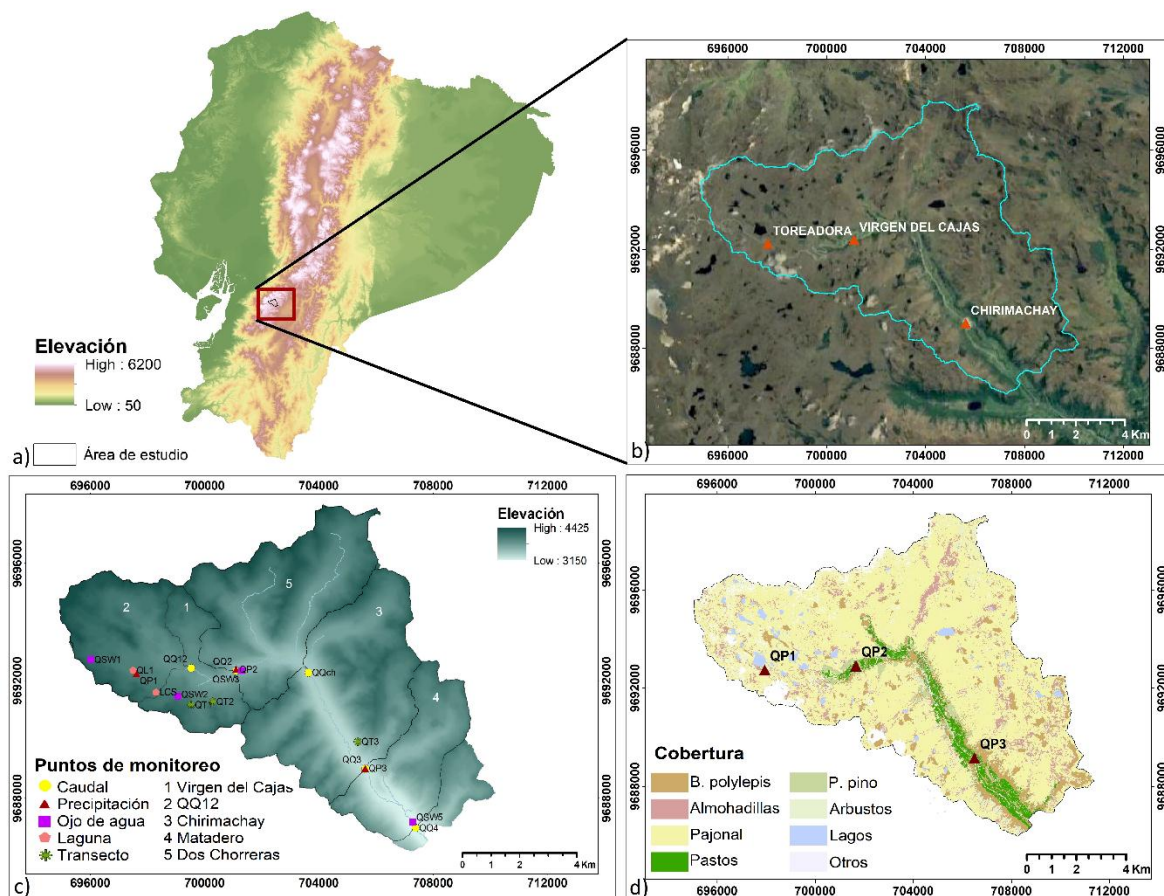


Figura 1: a) Localización geográfica de la cuenca del río Quinuas en Ecuador, b) Mapa de elevación y puntos de monitoreo dentro de la zona de estudio, c) Mapa de distribución de cobertura vegetal que conforma el área.

Generalmente los suelos histosoles al encontrarse en las zonas relativamente planas (<40%), están totalmente saturados la mayor parte del año, de modo que favorece el desarrollo y predominancia de almohadillas (*Plantago sp.*, *Valeriana sp.* y *Gentiana sp.*), parches de bosque natural (*Polylepis sp.* y *Gynoxys sp.*) y pastos (*Lolium sp.*). Tras existir una relación entre cobertura vegetal, tipo de suelo y topografía; los suelos andosoles cubren las laderas de la cuenca, en las que predominan especies vegetales como pajonal (*Calamagrotis intermedia* y *Fetusca sp.*) y pino (*Pinus patula*) (Mosquera, Céleri, et al., 2016; Mosquera, Lazo, Céleri, Wilcox, & Crespo, 2015; Pesántez et al., 2018). Es importante mencionar que las especies de pasto y pino son especies introducidas.

Tabla 1: Caracterización de las propiedades físicas de la cuenca de estudio.

SITIO	ÁREA	ELEVACIÓN		PRECIPITACIÓN MEDIA ANUAL	COBERTURA (%)								PENDIENTE (%)		
		MÍNIMA	MÁXIMA		BN	ALM	PAJ	PAS	PPINO	ARB	LAG	OTS	Rango de pendiente (%)	Área de la cuenca (km ²)	Pendiente Media (%)
QQ12	13.31	3793	4425	1150	2.97	8.17	76.73	0	0	3.47	8.34	0.32	0-20	4.79	34.74
													20-40	4.02	
													40-60	2.76	
													>60	2.76	
VIRGEN	21.82	3625	4425	1083	3.79	8.89	75.17	0.99	1.03	3.49	6.25	0.40	0-20	6.85	35.54
													20-40	6.22	
													40-60	4.39	
													>60	4.21	
CHORRERAS	45.82	3450	4425	982	4.14	8.87	76.06	2.07	1.24	3.99	3.25	0.39	0-20	12.65	41.87
													20-40	13.61	
													40-60	12.71	
													>60	14.49	
CHIRIMACHAY	73.18	3300	4425	997	5.66	7.99	74.79	3.04	1.41	4.33	2.60	0.35	0-20	15.61	44.78
													20-40	16.98	
													40-60	17.29	
													>60	22.97	
MATADERO	86.56	3200	4425	1064	7.40	8.17	71.74	3.94	1.24	4.81	2.36	0.33	0-20	17.99	45.15
													20-40	19.82	
													40-60	20.75	
													>60	27.48	

Descripción: BN (Bosque Natural), conformado por parches de bosque de polylepis; ALM (almohadillas), parches de cobertura vegetal característica de los humedales, también conformada por musgos; PAJ (Pajonal); PPIN (Plantaciones de Pino); ARB (Plantas Arbustivas); LAG (cuerpos de agua permanentes); OTS (Otros), engloba las porciones de terreno de las cuales no se tiene información.

2.2. Monitoreo y Análisis

2.2.1. Recolección de datos isotópicos

Las muestras de agua para los análisis isotópicos fueron recolectadas semanalmente durante el periodo 2014-2017, de manantiales (QSW), caudales (QQ), transectos (QT) y precipitación (QP). Las muestras de manantiales y caudales fueron extraídas directamente de las corrientes de agua, mediante el uso de jeringas. Para recolectar las muestras se realizó filtración ($0.45\mu\text{m}$) para eliminar las interferencias de origen orgánico producidas por la fuerza de arrastre de los cuerpos de agua (Esquivel-Hernández, Mosquera, et al., 2018). Las muestras fueron almacenadas en envases de vidrio ámbar de 2ml (Mosquera et al., 2012).

La recolección de muestras de precipitación, fue realizada en 3 puntos ubicados a lo largo de la cuenca de estudio, denominados como Toreadora (QP1) a 3962 m s.n.m, Virgen (QP2) a 3633 m s.n.m y Chirimachay (QP3) a 3314 m s.n.m (Figura 1c); en cada uno de estos puntos se instalaron colectores de precipitación de vidrio con capacidad de 1L, estos colectores fueron introducidos en contenedores plásticos recubiertos con papel aluminio para evitar procesos evaporativos (Sánchez-Murillo et al., 2017). De acuerdo con la guía para el muestreo de precipitación de la OIEA/GNIP (2014), se recomienda aplicar y combinar diferentes técnicas para la reducción de la exposición de las muestras a factores físicos externos que alteren el resultado de la concentración. Así como para evitar el fraccionamiento por evaporación se adicionó 0.5 cm de aceite de vaselina. Este envase fue conectado a un embudo de polipropileno con una esfera en su interior, mecanismo que permite la entrada de agua proveniente de la precipitación, al mismo tiempo que evita la entrada de objetos que puedan taponar el embudo. Para el almacenamiento en los envases de vidrio ámbar, fue necesario el uso de jeringas con agujas de longitud de 3 a 5 cm para traspasar la capa de aceite de vaselina y de esa manera lograr la extracción de 2ml de agua, tomando en cuenta que la aguja debe ser limpiada de los excesos de aceite después de la extracción (Mosquera et al., 2016).

Dentro de la zona de estudio se determinaron 3 laderas con vegetación característica, tales como, bosque de pino (QT3), bosque de polylepis (QT2) y pajonal (QT1), tal como muestra la figura 1c. Para cada área monitoreada se definió un transecto con distancias desde la base hasta el punto más alto de 280m, 180m y 208m respectivamente (Pesántez et al., 2018). A lo largo del gradiente altitudinal de cada ladera se encuentran instalados colectores de muestras de agua de suelo, en las

partes altas, medias y bajas; cada colector está conformado por 3 platos de succión de polipropileno de 30x30cm ubicados a una profundidad de 10, 35 y 75 cm, los cuales son los encargados de extraer el agua móvil de las diferentes tipos de horizontes y transportarlas a botellas de vidrio con una capacidad de 1L (Frisbee, Phillips, Campbell, Hendrickx, & Engle, 2010). Para el bosque de polylepis (QT2), las profundidades de instalación de los platos de succión fueron diferentes, debido a que el grosor de los horizontes varía con respecto a las otras laderas, la capa más profunda se encuentra a 50cm, la media a 25cm y la más superficial a 10cm.

2.2.2. Análisis de laboratorio de concentraciones isotópicas

Las muestras de los diferentes cuerpos de agua fueron analizados mediante el uso de un analizador Isotópico de Agua y Vapor de Agua marca Picarro L1102-i de precisión de 0.5‰ y 0.1‰ para deuterio y $\delta^{18}\text{O}$, respectivamente, el cual muestra los valores de las concentraciones (δ) en unidades por mil (‰), considerando VSMOW (Vienna Standard Mean Ocean Water), para $\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$ (Crespo, Lazo, Mosquera, & Cárdenas, 2011).

2.2.3. Análisis isotópico de la variabilidad temporal

De acuerdo con Craig (1961), existe una correlación lineal entre las concentraciones de $\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$ en los cuerpos de agua que no han sido sometidas a procesos de fraccionamiento isotópico frecuente. Razón por la cual se establece que la variación entre los isótopos es paralela y se puede determinar una ecuación de linealidad (ecuación 1).

$$\delta^2\text{H} = 8 \delta^{18}\text{O} + 10 \text{‰} \quad (1)$$

La línea trazada por esta ecuación, definida como Línea Meteorica Global (GMWL), es una referencia para la comprensión de la composición isotópica de los flujos superficiales y subsuperficiales en diversas partes del mundo. Por otro lado, la línea meteorica local de agua (LMWL), fue obtenida mediante la aplicación del modelo de regresión lineal simple, para determinar la relación entre las concentraciones isotópicas correspondientes a $\delta^2\text{H}$ en función de $\delta^{18}\text{O}$. El nivel de asociación lineal entre las 2 concentraciones, es decir, el ajuste de la recta a los puntos monitoreados fue definido mediante el cálculo del coeficiente de determinación R^2 .

La representación y comparación gráfica entre LMWL y GMWL, permite obtener información acerca del comportamiento hidrológico de la cuenca de estudio, como la mezcla del flujo, condiciones de recarga y procesos de evaporación por factores físicos (Clark, 2015). El comportamiento de $\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$ en un periodo determinado,

puede mostrar similitudes en su tendencia, por lo que la representación del fraccionamiento isotópico se la hace con una de las concentraciones (Dawson, Mambelli, Plamboeck, Templer, & Tu, 2002).

Los procesos de fraccionamiento a los que están sometidos los cuerpos de agua, en un periodo de tiempo determinado, permiten definir firmas isotópicas específicas comparables entre sí, estableciendo de esta manera sus interrelaciones.

2.2.4. Estimación de tiempos de tránsito

2.2.4.1. Determinación de función de entrada

Las funciones de transferencia son aplicadas para la obtención de concentraciones de salida de un trazador. Estos operadores son capaces de transformar una señal de entrada (precipitación) que traza un ciclo senoidal y generar una señal de salida (caudal) con diferente amplitud pero misma frecuencia (Kirchner, 2016). Es necesario mencionar que a cada función de entrada le corresponde una función de salida.

En la cuenca del río Quinuas se obtuvieron 3 señales de entrada, correspondientes a la precipitación (QP1, QP2 y QP3) y 5 señales de salida (QQ2, QQ12, QQ3, QQ4 y QQch), correspondientes a los caudales. En primera instancia, se identificó los caudales que se hallen dentro del área de influencia de cada punto de precipitación (Polígonos de Thiessen) y se les asignó la señal de entrada correspondiente al área en la que se encuentren. Estableciendo que la señal de entrada para QQ12, QQ2 y QQch sea QP2, para QQ3 y QQ4 sea QP3 y que a QP1 le correspondan las lagunas monitoreadas. No obstante, una vez aplicadas las distintas funciones de transferencia, las señales de entrada escogidas para cada señal de salida no pueden ser las indicadas. Para ello, es necesario probar con señales de entrada de zonas cercanas.

2.2.4.2. Corrección de la función de entrada

Una vez establecida la concentración de entrada para cada concentración de salida, se determina la variación altitudinal entre cada punto (precipitación-caudal). Para ello, es necesario establecer una relación lineal entre las elevaciones de los 3 puntos de precipitación, obteniéndose una ecuación que facilite la estimación del rango de variación isotópica entre 2 puntos ubicados a elevación diferente. Este valor es adicionado o quitado a la señal de entrada durante todo el periodo de análisis, dependiendo de la relación que se establezca entre la elevación y la concentración isotópica.

Posteriormente se analizan los eventos de precipitación que son poco usuales (>100mm), ya que la composición isotópica puede verse afectada por estos sucesos,

además el tiempo de tránsito promedio debe ser calculado para caudales base. Tras tener identificadas los periodos en los que ocurren los eventos peculiares, se procede a realizar una ponderación hacia atrás con las concentraciones isotópicas y cantidad de precipitación correspondiente a fechas anteriores. El tiempo requerido para este procedimiento, depende de la intensidad del evento que se busca corregir y de la duración del evento anterior a este, obteniéndose periodos que se amortiguan con 2 semanas atrás y otros hasta con 4 meses.

2.2.4.3. Funciones de transferencia

Los tiempos de distribución de tránsito (TTD) dan respuesta integrada de la llegada de un trazador conservativo a la salida de una cuenca, así como la descripción de las condiciones de flujo. En el sistema, la concentración del trazador, $C(t)$, puede ser determinada mediante la relación de la descarga (Q) y la masa del trazador presente en la salida del efluente (M), de esta manera, los TTD pueden ser estimados mediante:

$$g(t) = \frac{c(t)}{\int_0^{\infty} c(t)dt} \quad (2)$$

El transporte de un trazador conservativo a través de un sistema, también puede ser descrito matemáticamente por la integral de convolución, que señala que la concentración del flujo de salida (δ_{out}) se basa en la concentración del flujo de entrada (δ_{in}) (Capell et al., 2012), considerando también el periodo de tiempo que transcurre desde la inyección del trazador hasta su salida (τ) y un tiempo variable (t), obteniéndose de esta manera:

$$\delta_{out}(t) = \int_0^{\infty} g(\tau)\delta_{in}(t - \tau)d\tau \quad (3)$$

La aplicación de la solución inversa LCA (Lumped Convolution Approach), fue necesaria para la determinación de tiempos medios de tránsito, por lo que se realizó un ajuste de los tiempos de distribución de tránsito para que su adaptación a la concentración isotópica medida y simulada sea adecuada (McDonnell et al., 2010; Mosquera et al., 2016). Los modelos básicos de TTD se basan en diversos parámetros que ayudan a simular el comportamiento real de la zona de estudio (Tabla 2) (Muñoz-Villers, Geissert, Holwerda, & McDonnell, 2016). Para las diferentes cuencas de páramo del río Quinuas, se aplicó 5 modelos, tales como, el modelo exponencial (EM), modelo exponencial-pistón (EPM), modelo gamma (GM), modelo de dispersión (DM) y el modelo de dos reservorios lineales paralelos (TPLR).

El modelo exponencial describe una mezcla perfecta del trazador a través de las líneas de flujo que se transportan de manera exponencial en el sistema. Las líneas de

flujo cortas tienen un tiempo de distribución igual a 0, mientras que las líneas de flujo más largas tienden al infinito. Cabe mencionar que el trazador distribuido por los dos tipos de líneas de flujo, no se mezcla, considerando únicamente un parámetro de ajuste (τ), siendo:

$$g(t) = \tau^{-1} \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad (4)$$

El modelo exponencial-pistón simula un flujo con dos reservorios paralelos, en los que uno presenta una distribución exponencial y otro una distribución aproximada de flujo pistón. Este modelo toma a consideración dos parámetros de ajuste como η y τ , que describen el comportamiento de las líneas de flujo dentro del sistema. Matemáticamente está representado por:

$$g(t) = \left(\frac{\eta}{\tau}\right) \exp\left(-\frac{\eta t}{\tau} + \eta - 1\right) \quad (5)$$

La aplicación del modelo de dispersión a las concentraciones del trazador hace uso de dos parámetros de ajuste, como los tiempos de tránsito promedio y un parámetro de dispersión (D_p), este último describe cuan amplia y asimétrica puede ser la distribución de los tiempos de desplazamiento. El modelo de dispersión puede ajustar los tiempos de distribución con la inversa del número de Peclet, siendo así:

$$g(t) = \left(\frac{4\pi D_p t}{\tau}\right)^{-\frac{1}{2}} t^{-1} \exp\left[-\left(1 - \frac{t}{\tau}\right)^2 \left(\frac{\tau}{4\pi D_p t}\right)\right] \quad (6)$$

El modelo gamma es una extensión del modelo exponencial, en el que intervienen dos parámetros que describen la forma (α) y la escala (β) del sistema. La estimación de los tiempos medios de tránsito es obtenida a través del producto entre estos dos parámetros, es decir:

$$g(t) = \frac{\tau^{\alpha-1}}{\beta^{\alpha} \Gamma(\alpha)} \exp\left(-\frac{\tau}{\beta}\right) \quad (7)$$

Tanto el modelo gamma como el TPLR brinda resultados similares en la estimación de tiempos de tránsito. Esta función de transferencia considera los tiempos de residencia de la respuesta rápida o lenta del reservorio, quedando expresada como:

$$g(t) = \frac{\varphi}{\tau_f} \exp\left(-\frac{t}{\tau_f}\right) + \frac{1-\varphi}{\tau_s} \exp\left(-\frac{t}{\tau_s}\right) \quad (8)$$

Tabla 2: Modelos de parámetros agrupados para la determinación de tiempos de tránsito promedios.

MODELO	DISTRIBUCIÓN DE TIEMPO DE TRÁNSITO	PARÁMETROS
EXPONENCIAL (EM)	$g(t) = \tau^{-1} \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)$	$\tau(0 - 65)$
EXPONENCIAL PISTÓN (EPM)	$g(t) = \left(\frac{\eta}{\tau}\right) \exp\left(-\frac{\eta t}{\tau} + \eta - 1\right)$	$\tau(0 - 65)$ $\eta(0.5 - 4)$
DISPERSIÓN (DM)	$g(t) = \left(\frac{4\pi D_p t}{\tau}\right)^{-1/2} t^{-1} \exp\left[-\left(1 - \frac{t}{\tau}\right)^2 \left(\frac{\tau}{4\pi D_p t}\right)\right]$	$D_p(0.5 - 4)$
GAMMA (GM)	$g(t) = \frac{\tau^{\alpha-1}}{\beta^{\alpha} \Gamma(\alpha)} \exp\left(-\frac{\tau}{\beta}\right)$	$\alpha(0.01 - 4)$ $\beta(0 - 500)$ $\tau(\alpha \cdot \beta)$
TPLR	$g(t) = \frac{\varphi}{\tau_f} \exp\left(-\frac{t}{\tau_f}\right) + \frac{1-\varphi}{\tau_s} \exp\left(-\frac{t}{\tau_s}\right)$	$\tau_s(0 - 65)$ $\tau_f(0 - 8)$ $\varphi(0 - 1)$

Descripción: τ : trazador de tiempo de tránsito medio; η : proporción del volumen total del volumen de agua con distribución exponencial de los tiempos de tránsito; D_p : parámetro de dispersión; α y β : parámetros de forma y escala, respectivamente; τ_s : tiempo de tránsito del flujo rápido; τ_f : tiempo de tránsito de flujo lento; φ : parámetro de partición de flujo entre flujo rápido y lento expresado en porcentaje.

La validación de los resultados obtenidos al aplicarse las funciones de transferencia a las series de datos corregidas con el procedimiento anterior mencionado, es realizada mediante el uso del coeficiente de eficiencia Kling-Gupta (KGE) (Gupta, Kling, Yilmaz, & Martinez, 2009), con el fin de determinar el ciclo senoidal simulado que mejor se ajuste al comportamiento real de la cuenca. El modelo matemático es aceptado mediante el análisis estadístico de 10.000 simulaciones basadas en Monte Carlo considerando una distribución aleatoria uniforme de las variables involucradas en 5 de los modelos aplicados (Jacobs et al., 2018).

2.2.4.4. Relación entre características de paisaje y tiempos de tránsito promedio

Se relacionó los tiempos de tránsito promedio estimados con los porcentajes de área que cubren los diferentes tipos de vegetación y pendientes clasificadas de acuerdo a la Tabla 1. Esta relación se llevó a cabo mediante la aplicación de un análisis de regresión lineal simple que permite determinar la dependencia entre variables cuantitativas. El nivel de relación entre variables fue evaluado mediante 2 coeficientes de correlación, tales como Pearson y el coeficiente de determinación (R^2).

El coeficiente de determinación se debe encontrar en un rango de 0 a 1, siendo 0 el valor asignado para indicar que no existe algún tipo de relación y 1 el valor asignado para indicar que las 2 variables están fuertemente relacionadas entre sí. El coeficiente de correlación de Pearson varía entre -1 y 1, dado que indica la tendencia de relación. Si la variable independiente se incrementa en conjunto con la variable dependiente se obtiene un valor del coeficiente de Pearson entre 0 y 1, mientras que cuando la variable independiente disminuye y la variable dependiente aumenta se obtienen valores entre -1 y 0. Esta relación con sus coeficientes respectivos, incluido el nivel de significancia (p), fueron estimados mediante el uso de IBM SPSS Statistics Base 22.00.

2.2.5. Conceptualización del modelo hidrológico

Una vez analizada la variación temporal de las concentraciones isotópicas de cada uno de los sitios monitoreados, así como, estimados sus tiempos de tránsito, se estableció las posibles relaciones entre las características de paisaje (pendiente, cobertura vegetal, presencia de cuerpos de agua) de cada cuenca, para llegar a determinar el comportamiento del flujo en escenarios distintos (Tetzlaff, Carey, Laudon, & McGuire, 2010). Las características geomorfológicas de las cuencas fueron obtenidas mediante su delimitación en un sistema de geográfico de información (SIG), a través de la determinación de las direcciones de flujo en base a la topografía de la cuenca del río Quinuas, además se obtuvo las pendientes y cobertura vegetal dominantes en cada área (Tetzlaff et al., 2007).

3. RESULTADOS

3.1. Composición isotópica en precipitación

La pendiente obtenida de las relaciones entre $\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$ fue de 8.29‰ con una intersección (d-excess) de 16.67‰, estos valores al ser comparados con GMWL, establecida por Craig (1961), revelan una diferencia de 0.29‰ para $\delta^{18}\text{O}$ y de 6.67‰ para d-excess. La Figura 4a, muestra la tendencia de las pendientes de ambas rectas, así como la amplia variación de valores de concentración contenidas en las muestras de precipitación (Tabla 3), mientras que, la Figura 4b, muestra una comparación entre la relación de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ de las muestras de caudal, lagunas y manantiales con LMWL mencionada anteriormente.

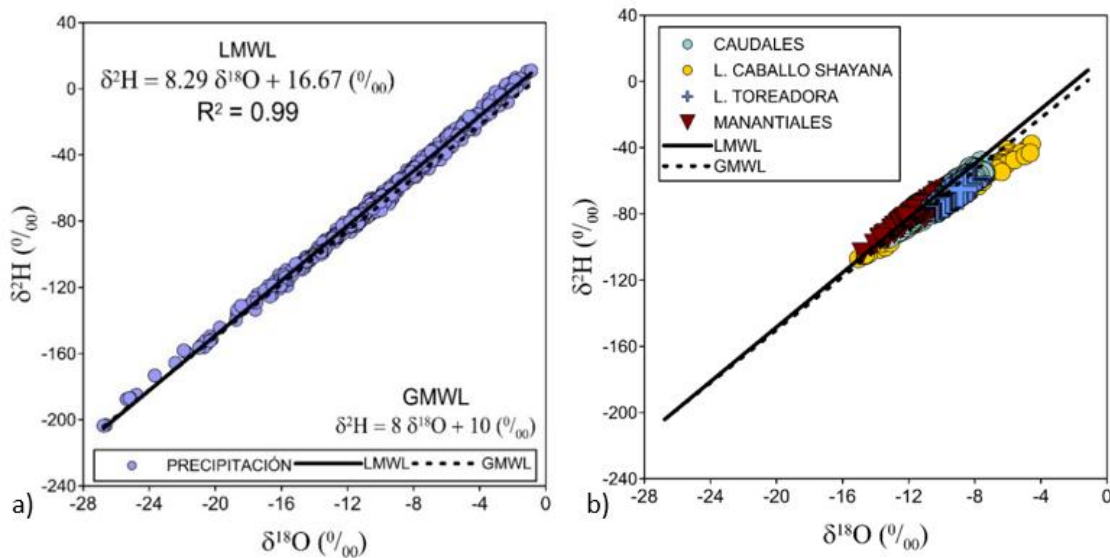


Figura 2: a) Relación entre $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ de muestras de precipitación (LMWL) correspondientes al periodo abril 2014-abril 2017, b) Comparación de LMWL con caudales, lagunas y manantiales

El análisis de las series de tiempo de precipitación revela una tendencia similar entre $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ (Anexo I), razón por la cual, la representación y los resultados reportados del fraccionamiento isotópico se lo realiza mediante valores de $\delta^{18}\text{O}$.

Tabla 3: Descripción de la variación de $\delta^{18}\text{O}$ para cada uno de los puntos monitoreados a lo largo de la zona de estudio

SITIO	ELEVACIÓN (m s.n.m)	MÁXIMO	MÍNIMO	PROMEDIO	DESVIACIÓN ESTÁNDAR
QP1	3962	-2.16	-26.63	-10.53	4.77
QP2	3633	-1.15	-26.77	-10.02	4.93
QP3	3314	-0.88	-25.19	-9.65	4.86
QQ2	3632	-7.49	-13.20	-9.61	1.10
QQ3	3315	-7.91	-13.29	-10.18	1.03
QQ4	3198	-7.92	-13.43	-10.17	1.00
QQ12	3784	-7.42	-12.69	-9.46	1.07
QQch	3442	-7.62	-13.19	-10.20	1.10
QSW1	4055	-9.76	-14.06	-11.52	0.66
QSW2	3941	-10.07	-14.81	-11.62	0.55
QSW3	3625	-9.96	-13.28	-11.19	0.47
QSW5	3218	-9.67	-11.80	-10.96	0.29
QL1	3924	-8.10	-10.27	-9.20	0.62
QSL1	3910	-7.88	-8.93	-8.93	0.63
LCS	3978	-4.56	-15.05	-9.17	2.19
QT1Aa	4002	-5.43	-16.40	-9.87	3.24
QT1 Am	4002	-5.48	-16.73	-10.57	2.46
QT1 Ab	4002	-8.51	-13.29	-9.89	0.98
QT1Ma	3959	-4.22	-16.22	-9.33	3.04
QT1 Mm	3959	-6.06	-16.54	-9.86	2.59
QT1 Mb	3959	-7.55	-13.79	-10.40	1.68
QT1Ba	3918	-5.03	-17.90	-9.81	3.41
QT1 Bm	3918	-5.35	-16.82	-10.10	2.31
QT1 Bb	3918	-6.72	-15.84	-10.34	1.46
QT2Aa	4012	-5.50	-16.79	-10.27	2.84
QT2 Am	4012	-5.06	-15.10	-10.54	2.47
QT2 Ab	4012	-7.96	-12.93	-10.45	1.57
QT2Ma	3975	-7.11	-11.92	-9.81	1.28
QT2 Mm	3975	-8.70	-14.63	-11.13	1.62
QT2 Mb	3975	-7.23	-15.21	-11.09	1.74
QT2 Ba	3873	-5.19	-18.46	-10.58	3.48

QT2 Bm	3873	-7.63	-14.53	-10.81	2.01
QT2 Bb	3873	-7.82	-15.35	-11.27	1.93
QT3Aa	3562	-2.75	-20.15	-9.86	4.45
QT3 Am	3562	-5.60	-17.64	-11.27	3.63
QT3 Ab	3562	-7.60	-17.78	-11.24	2.79
QT3 Ma	3486	-3.72	-18.33	-10.04	4.31
QT3 Mm	3486	-7.13	-21.28	-10.99	2.95
QT3 Mb	3486	-6.62	-15.40	-10.13	1.91
QT3 Ba	3411	-3.33	-23.13	-9.81	4.83
QT3 Bm	3411	-5.13	-18.38	-10.96	3.87
QT3 Bb	3411	-5.83	-18.15	-10.69	3.16

La relación entre las concentraciones isotópicas de los 3 puntos incluidos en este estudio muestra la influencia del efecto altitudinal en los valores de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$. La Figura 3 indica que por cada variación de 100m en la altitud entre 2 puntos distintos las concentraciones para $\delta^{18}\text{O}$ varían en 0.12‰.

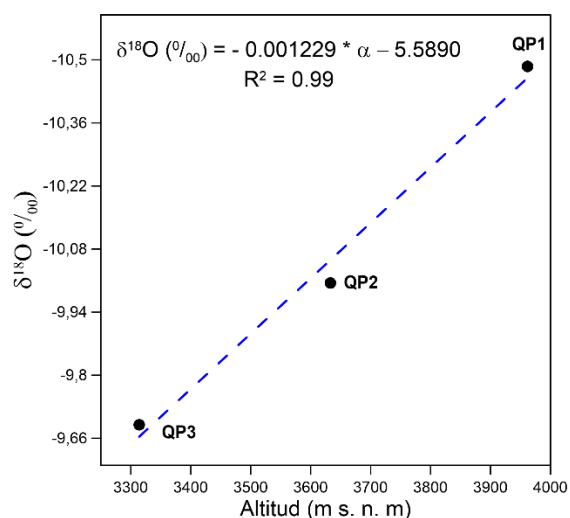


Figura 3: Influencia del efecto altitudinal en la concentración isotópica
Descripción: α , elevación de los puntos analizados

Las concentraciones isotópicas en la precipitación dentro de la cuenca del río Quinuas se encuentra entre rangos de -0.88‰ a -26.77‰ (Tabla 3). La Figura 4 revela que, para mayor cantidad de precipitación (mm), la concentración isotópica se muestra empobrecida, es decir, el valor negativo aumenta, mientras que para los meses julio-septiembre la concentración isotópica tiende a 0. La desviación estándar para los 3 puntos monitoreados presenta una variación de 0.08‰, demostrando que la tendencia que se representa en la figura 4, es similar para las áreas de estudio.

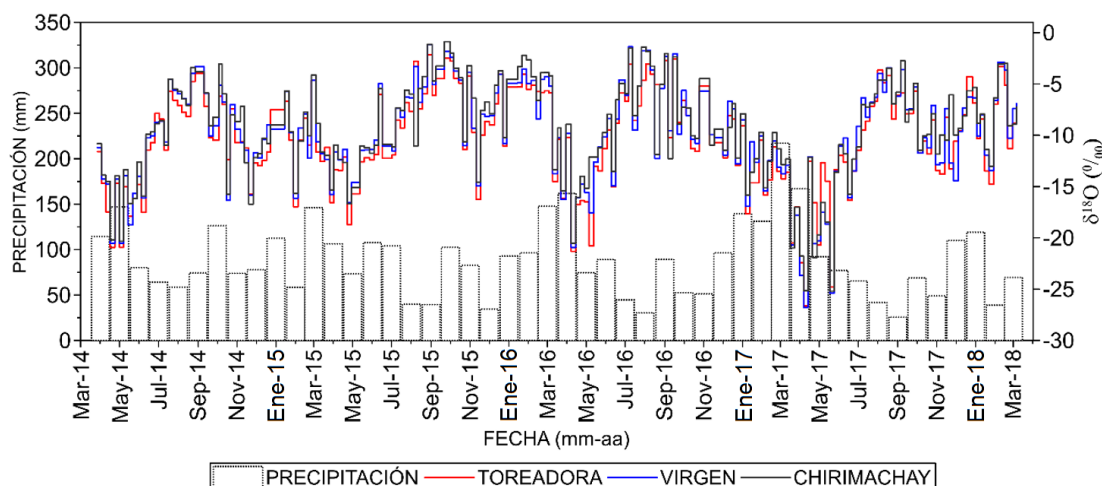


Figura 4: Cantidad de precipitación mensual vs concentración isotópica ($\delta^{18}O$) durante el periodo abril 2014-abril 2015

3.2. Composición isotópica en el caudal

Los valores de $\delta^{18}O$ para los 5 puntos de caudal monitoreados, presentan una atenuación de 0.14‰ aproximadamente, con respecto a la señal promedio de los 3 puntos de precipitación (Tabla 3). Para las cuencas que sobrepasan los 3620 m s. n. m., el valor promedio de $\delta^{18}O$ es -9.54‰, mientras que los caudales que se encuentran por debajo de esta altitud presentan la misma tendencia en la firma isotópica, no obstante, la concentración promedio es de -10.18‰.

Las cuencas bajas, como Dos Chorreras, Matadero y Chirimachay, presentan valores promedios de $\delta^{18}O$ de -10.20‰, -10.17‰, -10.18‰, respectivamente. Mientras que para las cuencas altas como Virgen del Cajas y QQ12, las concentraciones isotópicas revelan valores promedios de -9.61‰ y -9.46‰. Sin embargo, la diferencia entre estos grupos no excede al 1‰, como se muestra en la figura 5.

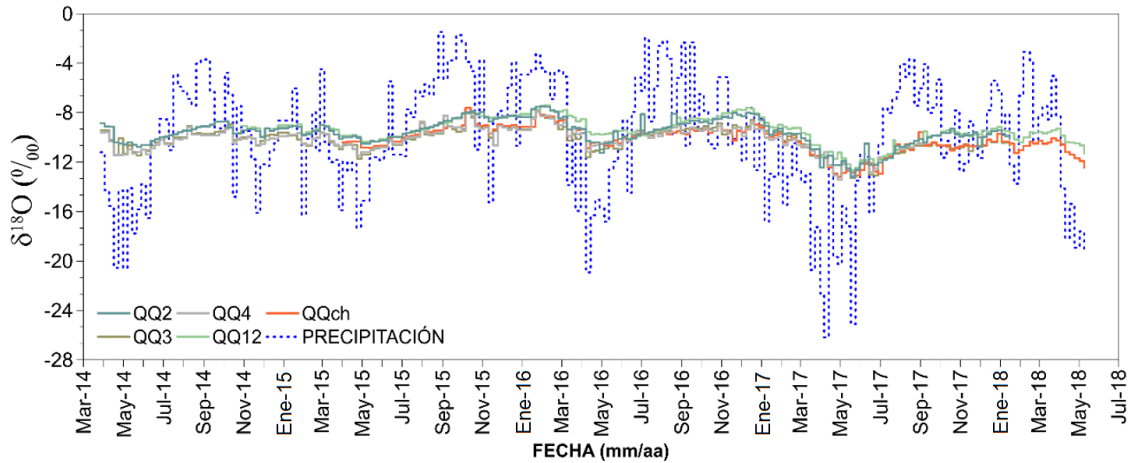


Figura 5: Serie de tiempo de los 5 puntos de caudal monitoreados en conjunto con el promedio de la señal isotópica de los 3 puntos de precipitación, para los periodos abril 2014-abril 2018.

La figura 6, muestra la tendencia de las relaciones entre concentraciones con respecto a LMWL y GWML. Para QQ2 y QQ12, se observa una ligera desviación con respecto a las rectas, la pendiente que presentan es de 6.7‰ y 6.9‰ respectivamente, mientras que la intersección de d-excess es de 14.13‰ por debajo de la GMWL.

Para el resto de los caudales, la pendiente varía entre 7.34‰ y 7.52‰ y la intersección de d-excess, difiere únicamente en 5‰ por debajo de lo establecido por Craig (1961).

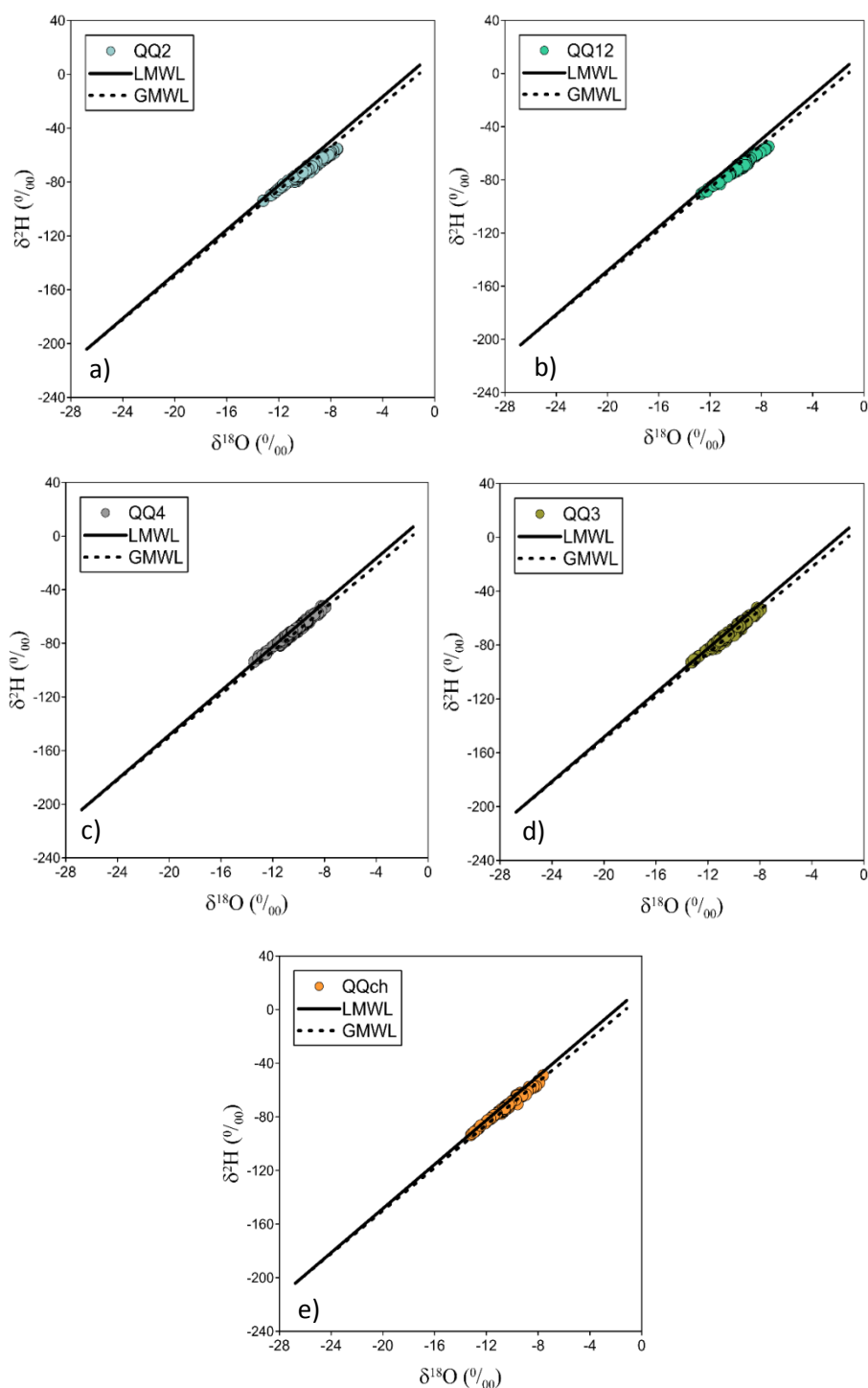


Figura 6: Comparación de LMWL y relación de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ de caudales monitoreados, a) Virgen del Cajas, b) QQ12, c) Chirimachay, d) Matadero, e) Dos Chorreras.

3.3. Composición isotópica en manantiales

Las señales isotópicas correspondientes a los 4 manantiales monitoreados a lo largo de la cuenca del río Quinuas, presentan una amplitud de valores de concentración bastante reducido, como indican las desviaciones estándar estimadas (Tabla 3). Las desviaciones estándar entre todos los puntos presentan diferencias máximas de -0.09‰ , a excepción del manantial que se encuentra en el área de Matadero (QSW5). Para el periodo del año 2017, la figura 7, muestra una respuesta del sistema al evento de precipitación, correspondiente a los meses de abril-junio. Al ser una señal parcialmente plana, los valores de las concentraciones isotópicas oscilan entre valores de -10.96‰ y -11.62‰ , para los 4 años de monitoreo, a excepción del periodo mencionado con anterioridad en el que se puede observar un empobrecimiento de la señal.

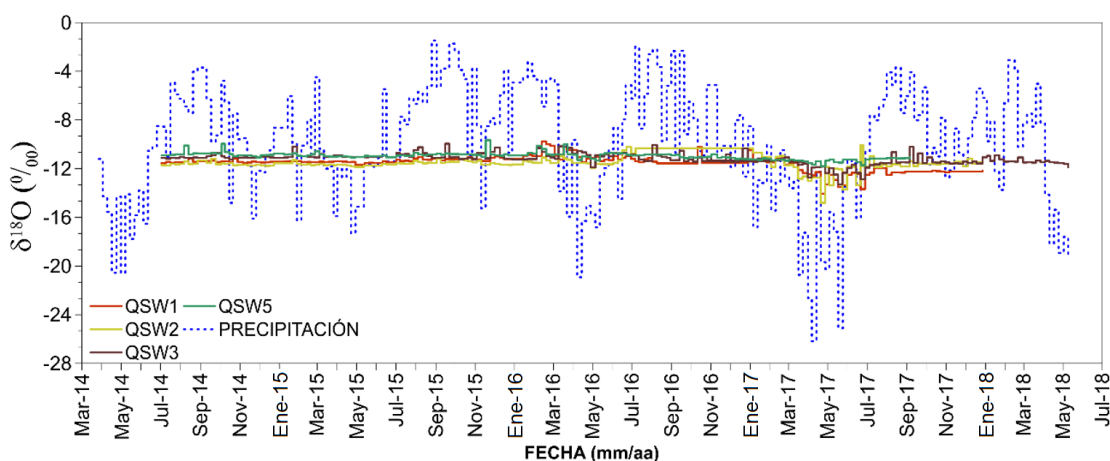


Figura 7: Serie de tiempo de los 4 puntos de manantiales monitoreados en conjunto con el promedio de la señal isotópica de los 3 puntos de precipitación, para el periodo junio 2014-junio 2018.

La figura 8, muestra las pendientes de las concentraciones isotópicas de los manantiales, que, al ser comparadas con la GMWL, tanto la pendiente como la intersección con d-excess está por debajo de lo establecido mundialmente. Para el caso de QSW5 (Figura 8d), el rango de variación de ambas concentraciones no es amplio en relación a los otros puntos.

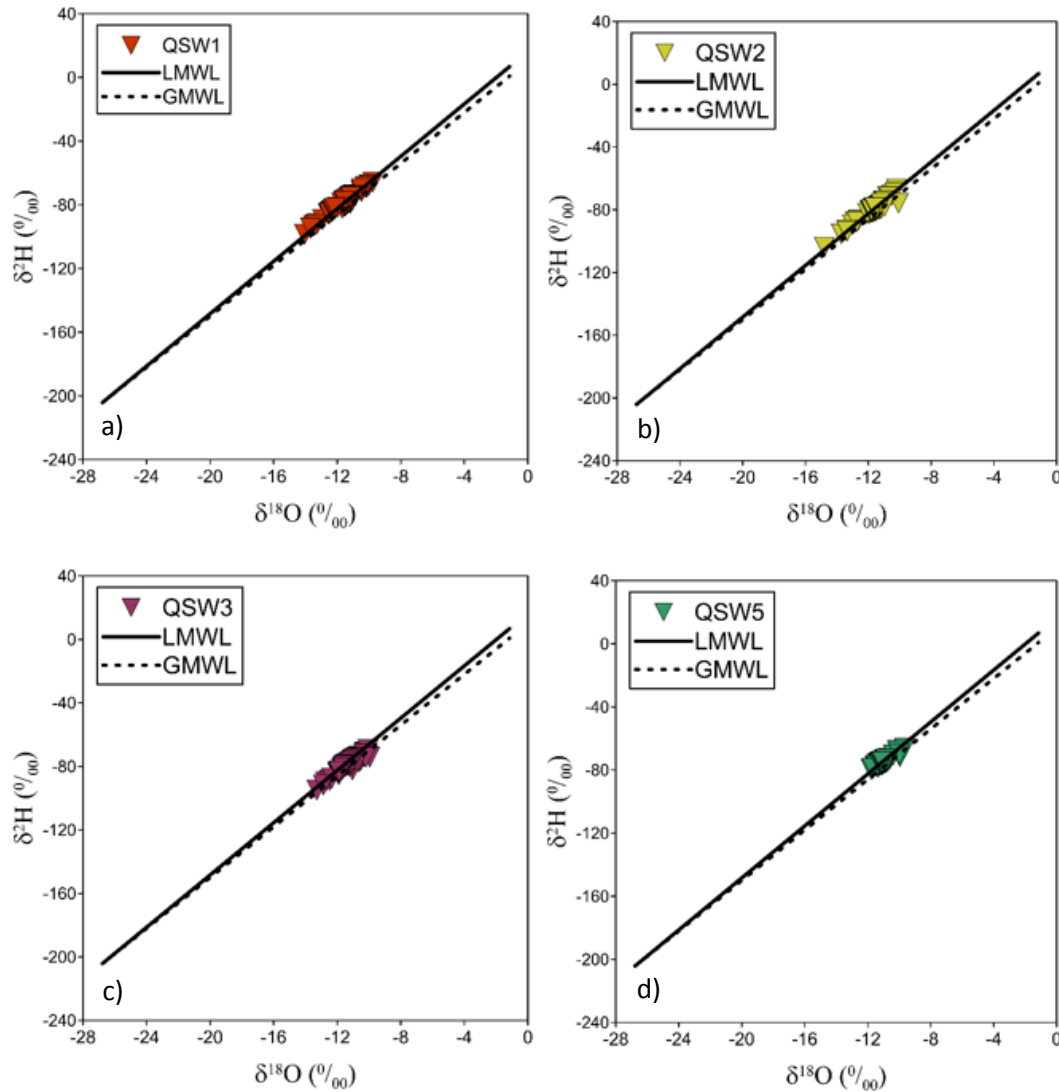


Figura 8: Comparación de LMWL y relación de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ de manantiales monitoreados, a) Manantial dentro de la cuenca 1, b) Manantial dentro de la cuenca 2, c) Manantial dentro de la cuenca 2, d) Manantial dentro de la cuenca 4.

3.4. Composición isotópica en lagunas

La variación de las concentraciones isotópicas de las 2 lagunas monitoreadas presenta una diferencia de promedios que no excede al 0.5‰ aproximadamente. Para Toreadora, el $\delta^{18}\text{O}$ en el punto de entrada y salida de la laguna, no superan valores de -10.27‰ y -7.88‰ y sus desviaciones estándar son las mismas (Tabla 3), mientras que para la Laguna Caballo Shayana (LCS), se observa una amplitud en la concentración de $\delta^{18}\text{O}$ similar a la de la precipitación como se muestra en la figura 10.

Las señales de las firmas isotópicas de la laguna Toreadora en la entrada y salida, presentan atenuación de -3‰ a -6‰, con respecto a la señal de LCS. La variación de concentraciones también puede ser evidenciada en la Figura 9.

Al analizar las tendencias con respecto a GMWL y LMWL, las concentraciones para LCS se encuentran en un rango más amplio que para Toreadora. Las pendientes de ambos puntos de monitoreo son similares entre ellas, siendo 6.61‰ para LCS y 6.79‰ para Toreadora. Estos valores comparados con LMWL muestra una diferencia de 1.6‰ aproximadamente, mientras que la intersección de d-excess tiene una variación de -4‰.

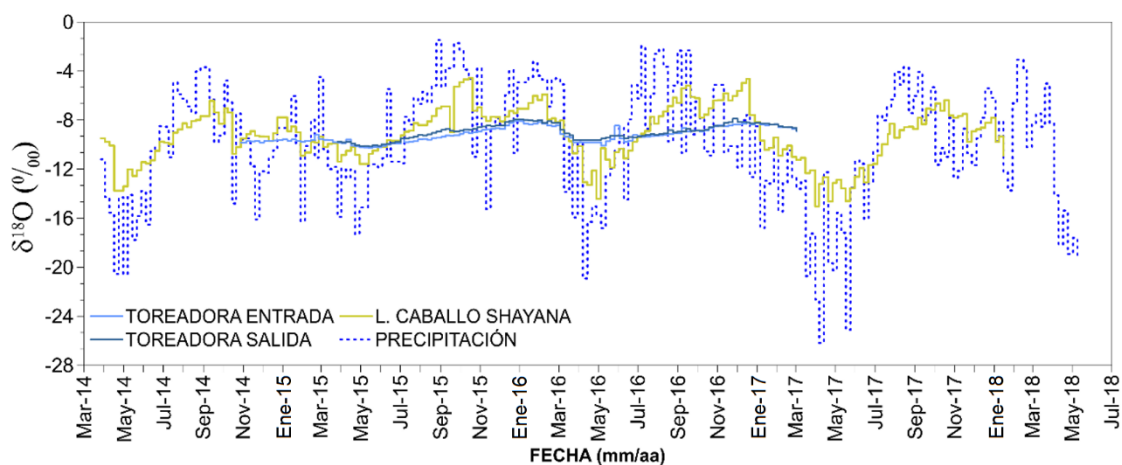


Figura 9: Serie de tiempo de las 2 lagunas monitoreadas en conjunto con el promedio de la señal isotópica de los 3 puntos de precipitación.

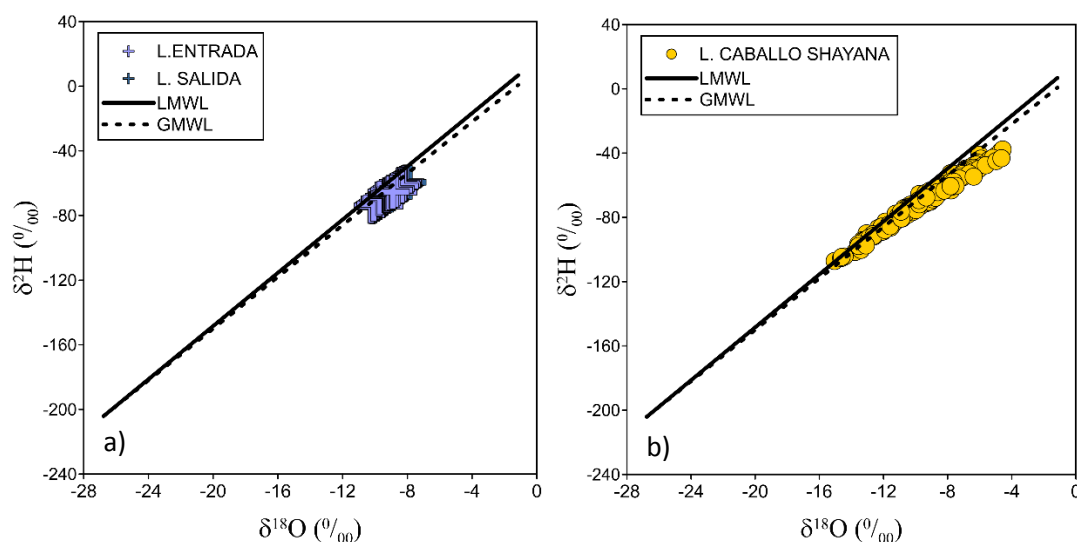


Figura 10: Comparación de LMWL y relación de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ de lagunas monitoreadas, a) Laguna Toreadora entrada y salida b) Laguna Caballo Shayana.

3.5. Composición isotópica en transectos

3.5.1. Precipitación vs pajonal

3.5.1.1. Pajonal Alto

El horizonte orgánico menos profundo (Alto-alto-10cm), presenta una reacción rápida a los eventos de lluvia durante todo el periodo de monitoreo (Figura 11a). Al poseer una tendencia similar a la precipitación sus concentraciones de $\delta^{18}\text{O}$ fluctúan entre valores de -5‰ hasta -16‰ con una desviación estándar de 3.24 (Tabla 3).

En la parte Alta-media (35cm) de la zona de monitoreo, la reacción de la concentración isotópica en el periodo abril 2016-julio 2016, refleja un empobrecimiento en su señal, al igual que en la parte Alta-alta en este mismo periodo. A pesar de presentar un rango de variación isotópico similar a la capa superficial del punto anterior, existe atenuación de la señal entre los valores de -9‰ y -10‰, disminuyendo la desviación estándar a 2.46.

Con respecto a la parte más profunda (75cm) de la parte alta del transecto de pajonal, la señal isotópica se encuentra más atenuada en relación a las concentraciones de los 2 puntos anteriores, esta variabilidad también es evidente en la Figura 11b, al igual que en la Table 3, en la que se establece una desviación estándar de 0.98.

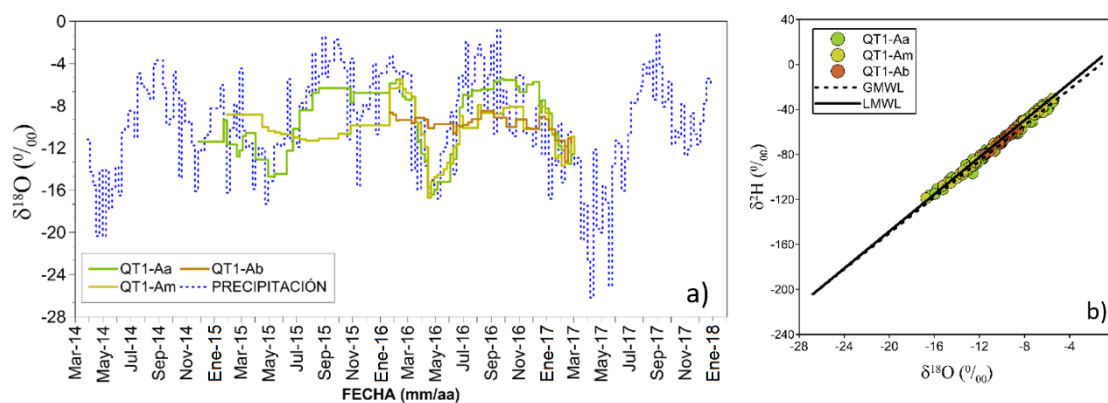


Figura 11: a) Serie de tiempo de Parte Alta del Transecto 1 a 3 profundidades distintas, b) Comparación de LMWL y relación de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ de las 3 profundidades analizadas.

3.5.1.2. Pajonal Medio

La variación isotópica para la parte de Pajonal Medio presenta un comportamiento similar a la de la parte de Pajonal Alto. La figura 12a, muestra que la parte Media Alta (Ma) y Media Media (Mm), tienen una respuesta rápida y una tendencia similar a la señal de precipitación. Los rangos de variación de ambas oscilan entre -4 y -16% con desviaciones estándar similares (Ver tabla 3).

Para la parte Media-Baja, la Figura 12a y 12b muestra atenuación en su señal con respecto a las 2 primeras profundidades, debido a que su media es de -10.40 y desviación estándar de 1.68.

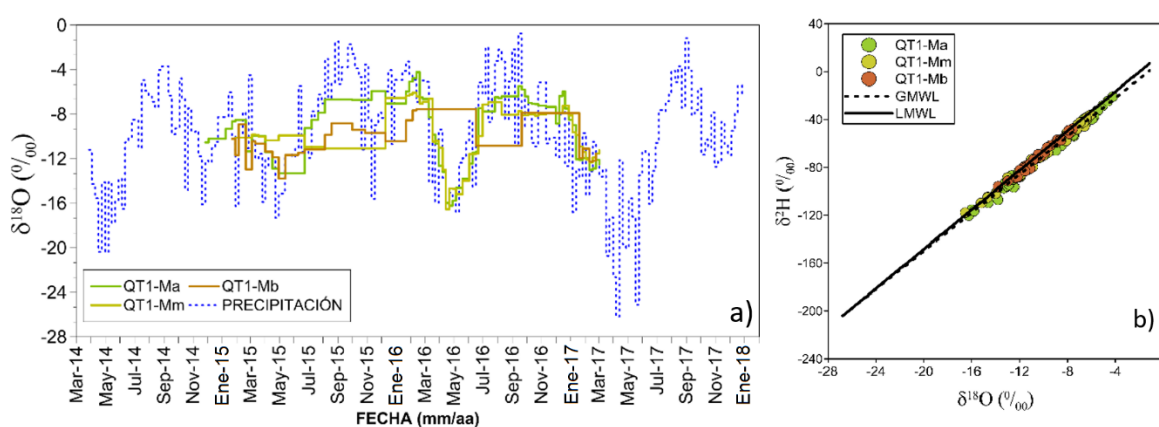


Figura 12: a) Serie de tiempo de Parte Media del Transecto 1 a 3 profundidades distintas, b) Comparación de LMWL y relación de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ de las 3 profundidades analizadas.

3.5.1.3. Pajonal Bajo

La concentración isotópica para el horizonte más superficial (Bajo-Alto) tiene una respuesta similar a los de la parte Alta y Media de todo el transecto. Al igual que los puntos de monitoreo ubicados en la misma profundidad (10cm) su desviación estándar oscila entre 3 y 3.5, mientras que, para el punto de monitoreo ubicado a 75cm de la superficie, el rango de concentración isotópica es similar a los que se encuentran a profundidades menores (Figura 13), sin embargo, su desviación estándar es de 1.46.

Para las 3 zonas del transecto (Alta, Media y Baja), los puntos pertenecientes al horizonte orgánico tienen una desviación estándar de 3.04 a 3.41 para 10cm de profundidad y de 2.31 a 2.59 para 35cm.

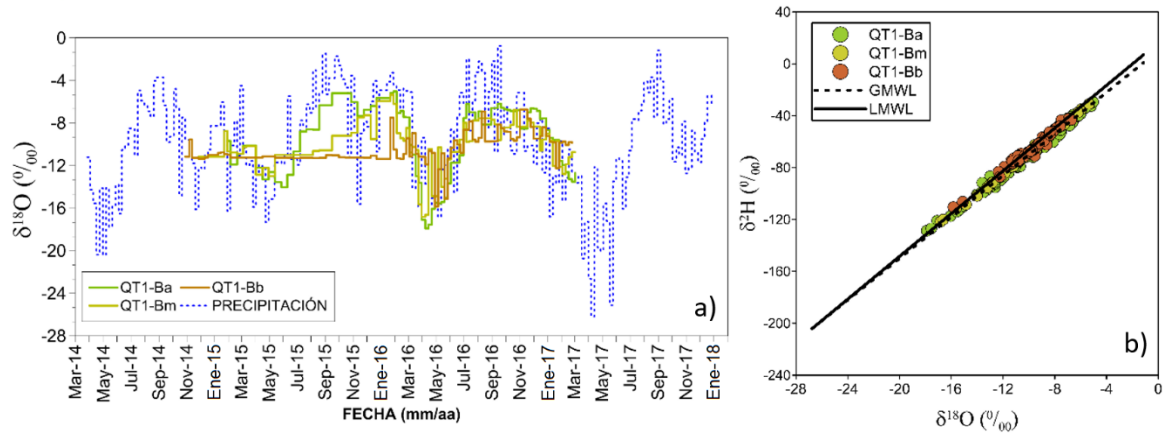


Figura 13: a) Serie de tiempo de Parte Media del Transecto 1 a 3 profundidades distintas, b) Comparación de LMWL y relación de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ de las 3 profundidades analizadas.

3.5.2. Precipitación vs bosque de polylepis

3.5.2.1. Bosque de polylepis alto

La figura 14a, muestra que para la parte Alta-alta y Alta-media la amplitud de las señales no sobrepasa 0.5‰ entre ellas, mientras que para la parte Alta-baja aumenta la diferencia en los meses de marzo 2016- julio 2016 (figura 14a). La capa alta como media muestran promedios de variación isotópica similares (Tabla 3) así como se puede observar en la figura 14b que la relación entre concentraciones varía ligeramente, verificándose con la comparación de los valores de desviaciones estándar.

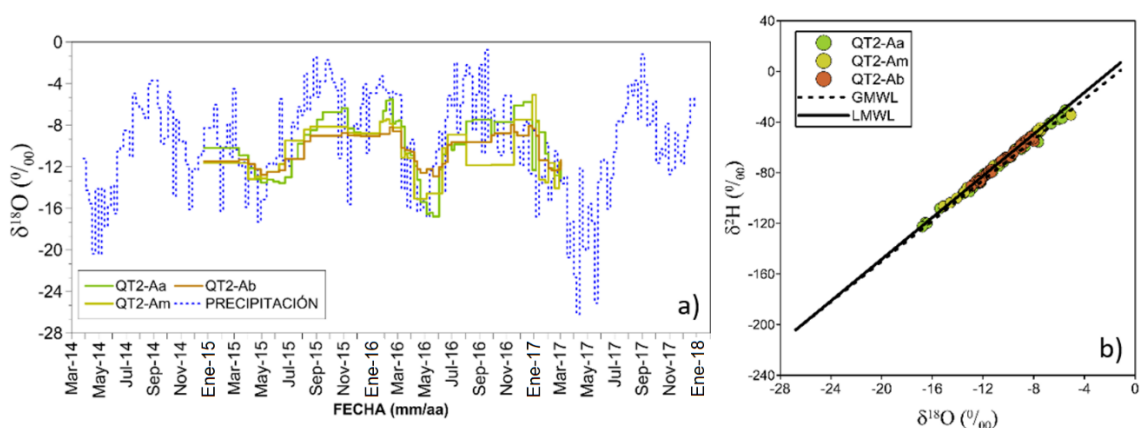


Figura 14: a) Serie de tiempo de Parte Alta del Transecto 2 a 3 profundidades distintas, b) Comparación de LMWL y relación de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ de las 3 profundidades analizadas.

3.5.2.2. Bosque de Polylepis Medio

Las 3 profundidades muestran una atenuación significativa en relación a la señal isotópica de la precipitación como se indica en la figura 15a, la parte media baja posee una desviación estándar de 1.74 que es mayor con respecto a las otras profundidades de este punto, sin embargo, la diferencia entre las 3 profundidades no sobrepasa los 0.35 (Tabla 3). El punto Medio-alto muestra una señal más enriquecida para el periodo octubre 2016- enero 2017. Dado que las tendencias y rangos de variación son similares, la Figura 15b presenta las concentraciones isotópicas de una profundidad, puesto que la restantes presentan la misma tendencia y se encuentran por debajo.

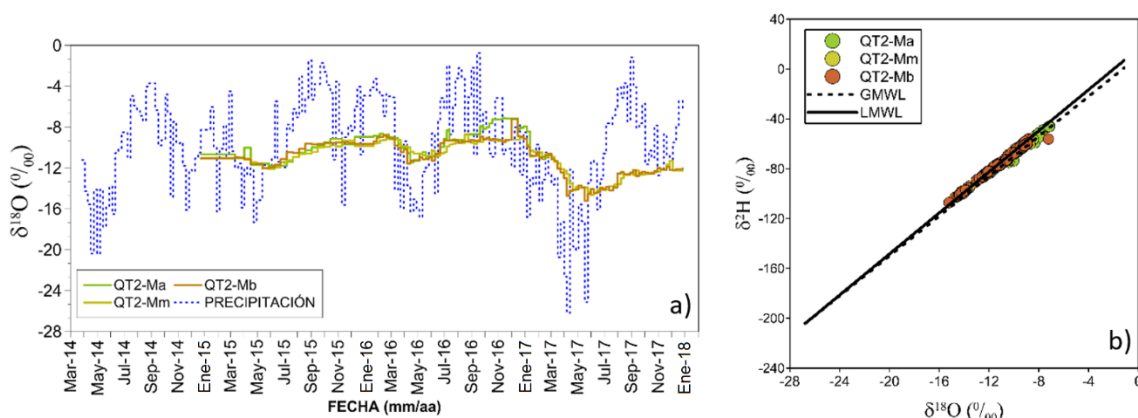


Figura 15: a) Serie de tiempo de Parte Media del Transecto 2 a 3 profundidades distintas, b) Comparación de LMWL y relación de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ de las 3 profundidades analizadas.

3.5.2.3. Bosque de Polylepis Bajo

La parte Baja-alta muestra una reacción rápida a los eventos de precipitación, presentando una desviación estándar cercana a la de las concentraciones isotópicas de lluvia (Tabla 3), mientras que las señales para las profundidades de 25 cm y 50 cm, la atenuación de la señal es evidente (Figura 16a), inclusive el rango de variabilidad isotópica entre valores máximos y mínimos es de 0.7‰ aproximadamente, al igual que su desviación estándar presenta la misma diferencia, por lo que los procesos de evaporación son similares en las 2 profundidades.

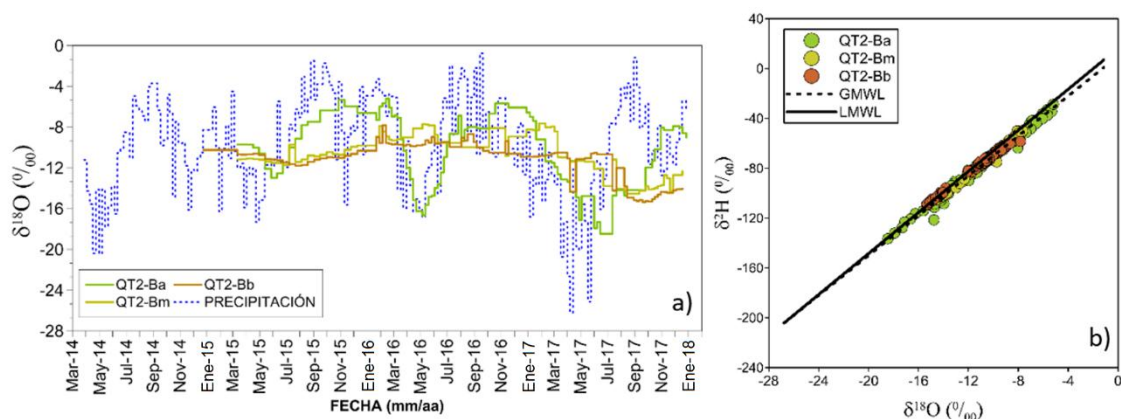


Figura 16: a) Serie de tiempo de Parte Baja del Transecto 2 a 3 profundidades distintas, b) Comparación de LMWL y relación de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ de las 3 profundidades analizadas.

3.5.3. Precipitación vs bosque de pino

3.5.3.1. Bosque de pino alto

La variación isotópica de la parte Alta-alta del transecto de bosque de pino presenta una tendencia similar a la señal de precipitación, tal como se muestra en la figura 17a, al poseer firmas isotópicas parecidas, los rangos de sus concentraciones también oscilan entre -2‰ y -20‰, al igual que su desviación estándar muestra una dispersión de entre 4.45 y 4.8 (Ver tabla 3). Las 2 profundidades siguientes señalan una atenuación con respecto a la profundidad de 10cm, por lo que las reacciones a los eventos húmedos no son bien definidos, a excepción de la parte Alta-Media en el mes mayo 2016-julio 2016 y marzo 2017-junio 2017 (figura 17b).

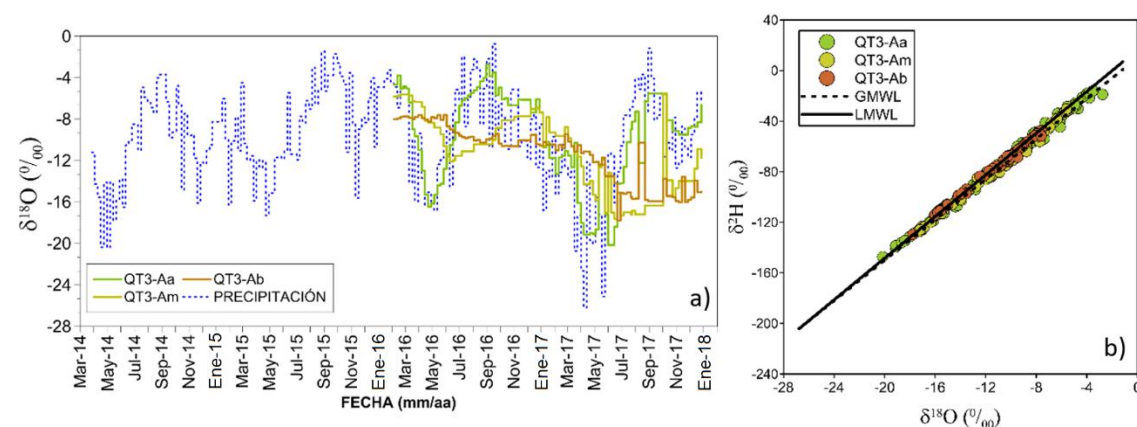


Figura 17: a) Serie de tiempo de Parte Alta del Transecto 3 a 3 profundidades distintas, b) Comparación de LMWL y relación de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ de las 3 profundidades analizadas.

En la parte Alta-Baja, la reacción ante el evento de precipitación mencionado con anterioridad, se lo puede definir como gradual, ya que no se observa un declive o enriquecimiento de la señal de forma drástica.

3.5.3.2. Bosque de Pino Medio

Al igual que el caso anterior la señal isotópica de la parte Media-Alta, tiene una similitud con la firma de la precipitación (Figura 18a), de la misma forma, como se observa en la figura 18b el rango de variación es amplio, revelando una desviación estándar de 4.31. Cabe mencionar que el enriquecimiento isotópico no sobrepasa una concentración de -19. La parte Media-media, a pesar de presentar concentraciones isotópicas en un rango de -7.13‰ a -21.28‰ y una desviación estándar de 2.95, al igual que puede ser apreciado en la figura 18b.

Para el horizonte más profundo, la atenuación que presenta la señal es evidente, al igual que su variabilidad de concentración isotópica no es amplia como la del horizonte más superficial.

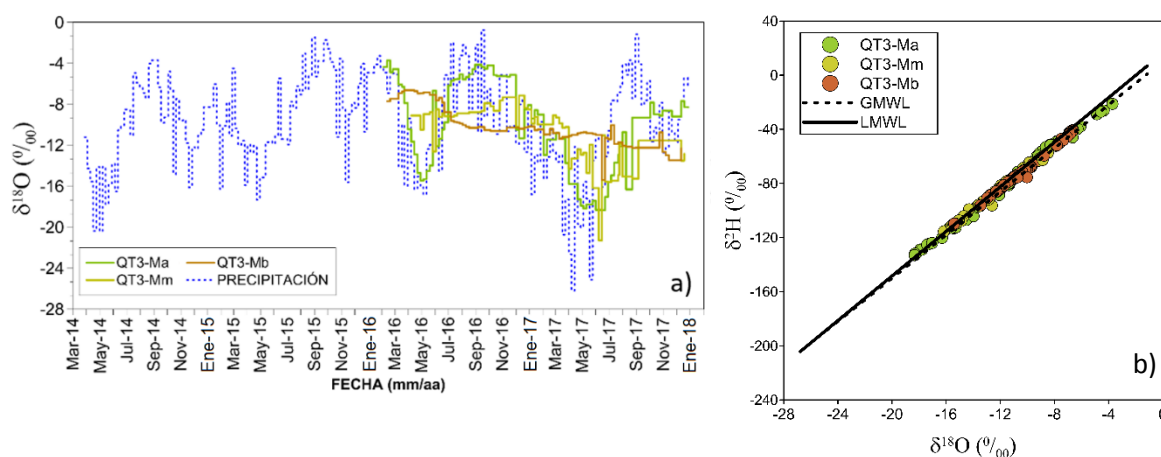


Figura 18: a) Serie de tiempo de Parte Media del Transecto 3 a 3 profundidades distintas, b) Comparación de LMWL y relación de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ de las 3 profundidades analizadas.

3.5.4. Precipitación vs pasto

En la zona de monitoreo, la parte Baja-Alta, tiene una variación de concentración isotópica de -3.33‰ a -23.13‰, con una desviación estándar de 4.83, por los cambios en los valores de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ son similares a los de la precipitación figura 19a. El horizonte Bajo-medio y Bajo-bajo, presentan valores máximos y mínimos con diferencias no mayores a -0.7‰, así como se muestra en la figura 19b su variación de concentraciones es similar.

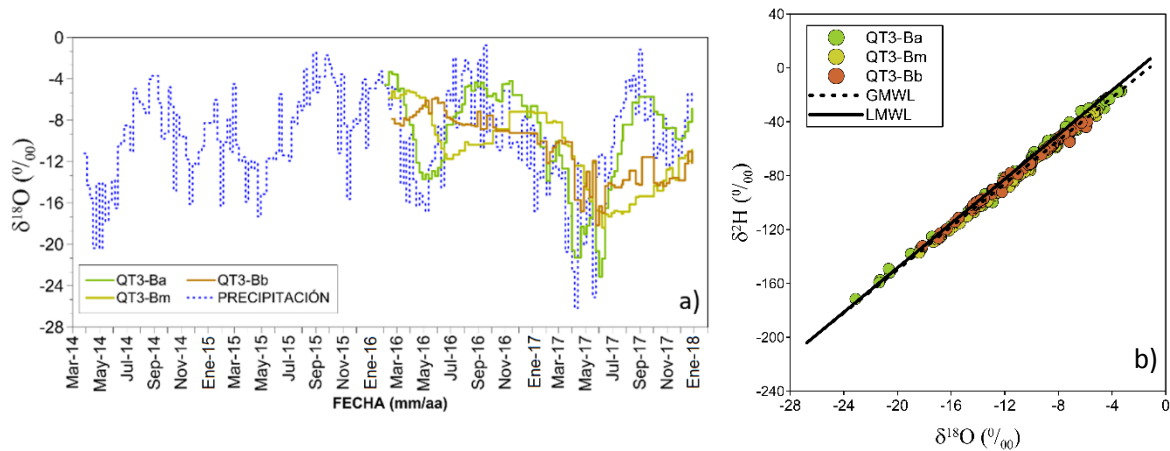


Figura 19: a) Serie de tiempo de Parte Baja del Transecto 3 a 3 profundidades distintas, b) Comparación de LMWL y relación de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ de las 3 profundidades analizadas.

3.6. Tiempo de tránsito promedio dentro de las cuencas monitoreadas

3.6.1. Caudales

Tras obtener las diferentes simulaciones con las 5 funciones de transferencia explicadas en la sección 2.2.4.3., se presentaron diferentes valores de tiempos de tránsito promedio y de coeficientes de eficiencia del modelo que pueden ser visualizados en el Anexo III. En la Tabla 4 se expone únicamente el tiempo de tránsito, KGE y NSE simulado por el modelo exponencial-pistón, gamma, dispersión y TPLR para la cuenca de QQ12. A pesar de presentar coeficientes de eficiencia altos (>0.6), el ajuste a los diferentes parámetros de cada función de transferencia (Tabla 2) no es adecuado, a excepción del modelo exponencial. Por lo cual, en esta sección se reportan las simulaciones de todas las cuencas obtenidas mediante EM.

Tabla 4: Tiempos de tránsito promedios obtenidos mediante la aplicación de modelos de convolución agrupados a QQ12 con sus respectivos coeficientes de eficiencia.

MODELO	TT	KGE	NSE	
EPM		15.21	0.86	0.71
GAMMA		24.94	0.87	0.73
DISPERSION		84.37	0.82	0.64

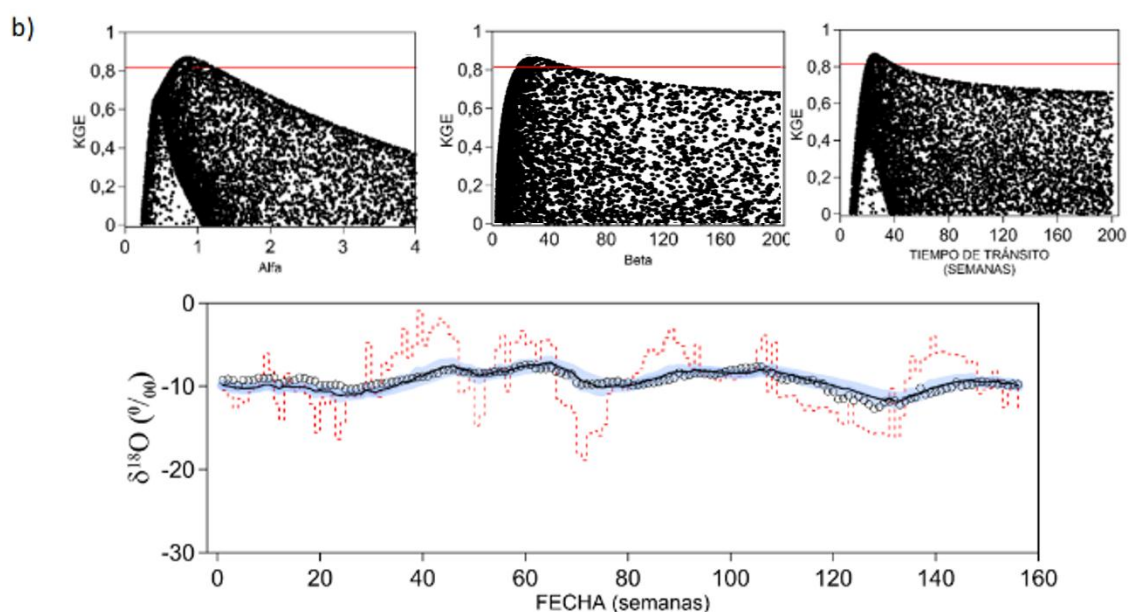
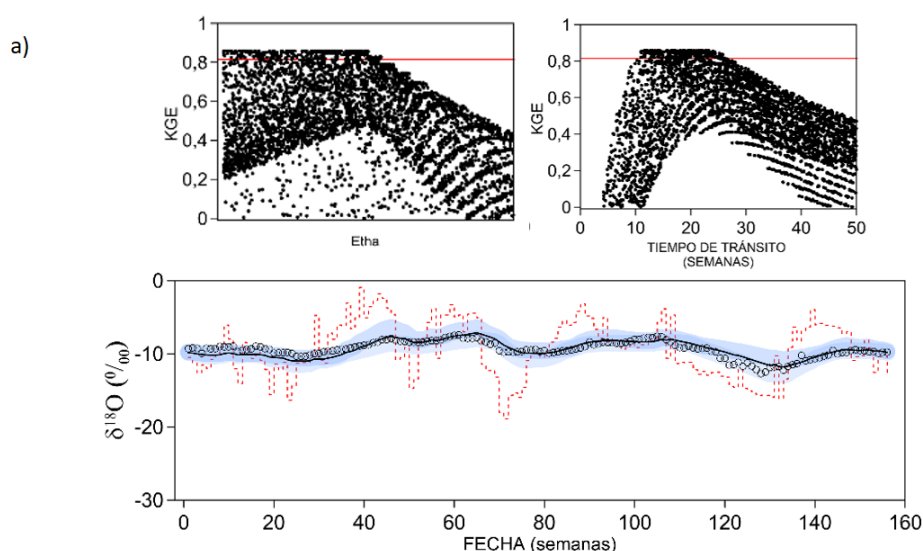
TPLR

184.53

0.88

0.77

La principal dificultad en la estimación de tiempos de tránsito de una cuenca es la determinación y corrección de la función de entrada, por lo que, para los eventos húmedos, tales como abril, mayo, junio y julio se realizó una ponderación con los eventos de precipitación anterior. El tiempo para lograr atenuar la señal varía generalmente entre 2-8 semanas, a excepción del año 2016, en el que se presenta una etapa muy húmeda que produce un desequilibrio en el sistema, por lo que se debe considerar 20 semanas atrás para amortiguar el efecto del evento en la señal isotópica.



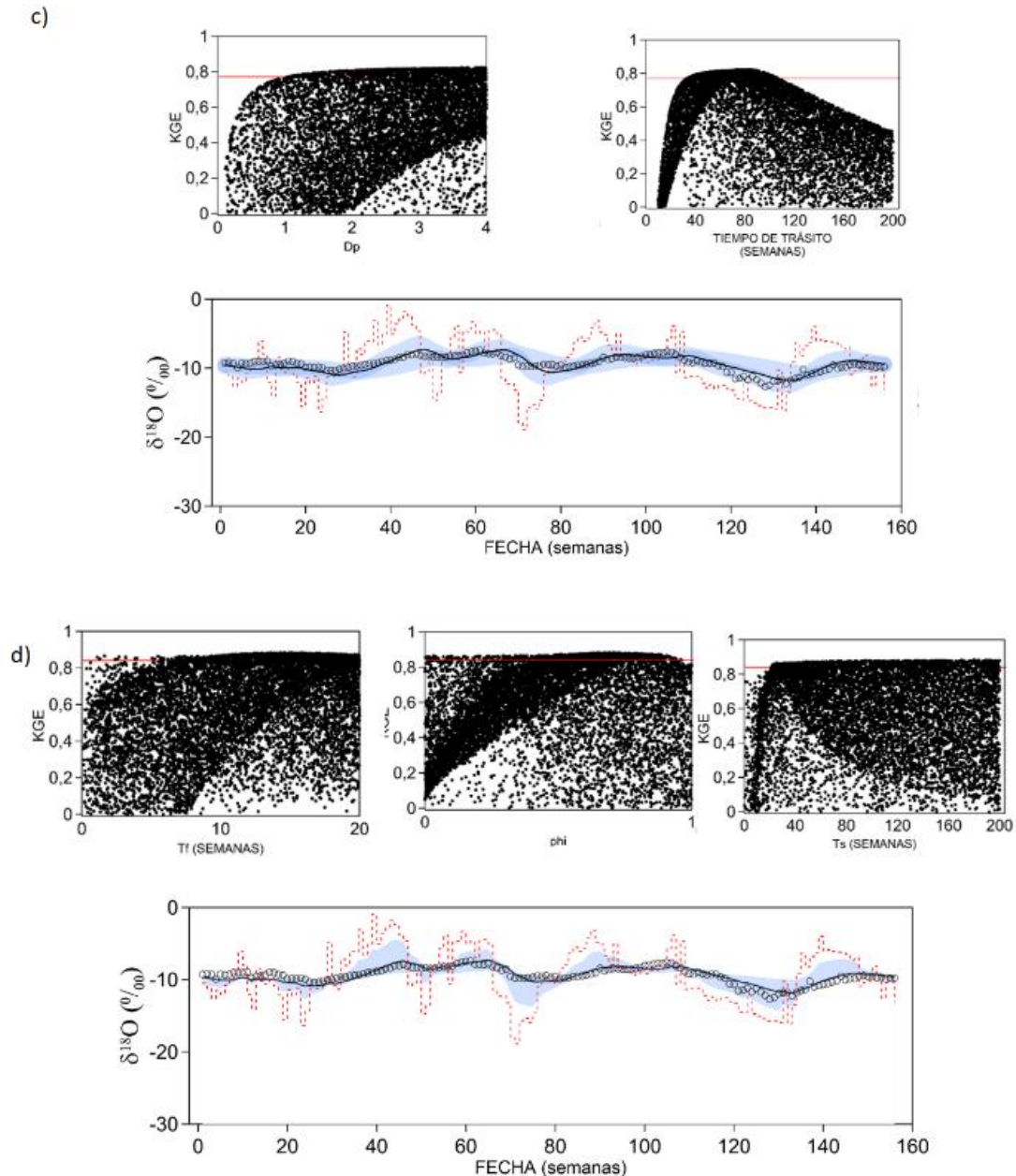


Figura 20: Simulaciones de tiempos de tránsito promedio para QQ12, a) Modelo Exponencial Pistón, b) Modelo Gamma, c) Modelo de Dispersión, d) Modelo de Dos reservorios paralelos (TPLR)

La calibración de los modelos hidrológicos se la realiza mediante la verificación de 2 tipos de coeficientes de eficiencia, tales como Kling-Gupta y Nash-Sutcliffe (Gupta et al., 2009), reportados en la tabla 5, al igual que también se resume el tiempo de tránsito promedio de las 5 cuencas monitoreadas en semanas, tras haber aplicado las correcciones correspondientes a cada una de las funciones de entrada. Es importante mencionar que cada una de las cuencas posee condiciones y variaciones isotópicas

diferentes por lo que se analiza periodos completos con ajustes específicos para cuenca y los eventos de lluvia ocurridos.

Tabla 5: Tiempos de tránsito promedios de cada una de las cuencas monitoreadas, incluyendo 2 lagunas que conforman la cuenca del río Quinuas.

SITIO	KGE	NSE	TIEMPO DE TRÁNSITO (SEMANAS)	APROXIMADO EN MESES	FUENTE
QQ12	0.87	0.72	23.01	6	QP2
CHIRIMACHAY	0.48	-0.12	38.10	10	QP2
2 CHORRERAS	0.86	0.69	50.42	13	QP2
MATADERO	0.62	0.21	41.40	10	QP3
VIRGEN DEL CAJAS	0.74	0.41	34.41	9	QP3
TOREADORA	0.88	0.73	40.88	10	QP1
CABALLO SHAYANA	0.70	0.30	12.17	3	QP3

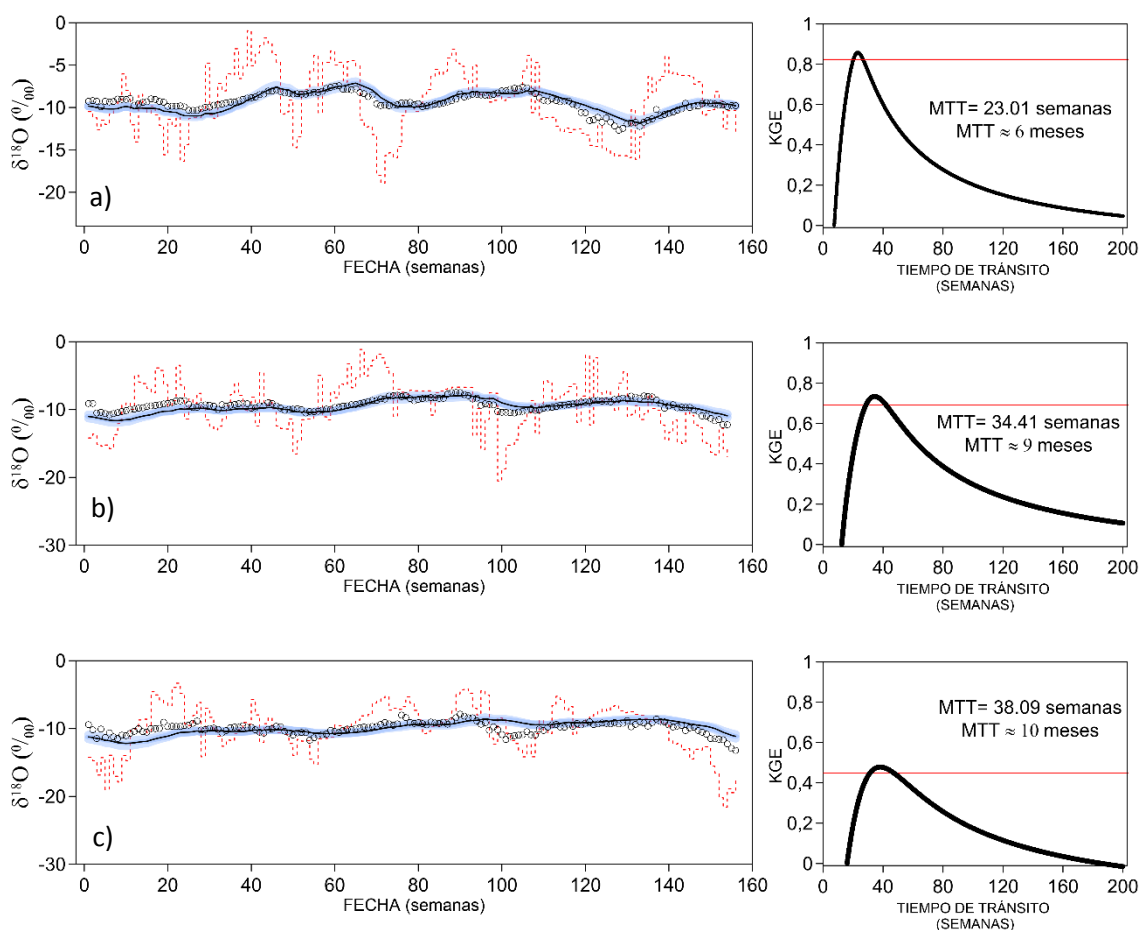
Para cuenca QQ12 se analizó muestras semanales del periodo referente a abril 2014-abril 2017, obteniéndose como resultado un tiempo de tránsito promedio de 23.01 semanas, equivalente a 6 meses. El KGE y NSE, para esta cuenca son de 0.87 y 0.72 respectivamente. Al ser próximos a la unidad el resultado obtenido es válido para la descripción adecuada de la zona. Los valores de coeficientes de eficiencia reportados en la tabla 4 fueron obtenidos mediante el ajuste de la señal isotópica de lluvia del punto QP2 (precipitación Virgen del Cajas), mientras que la aplicación y ajuste de funciones de entrada de otros puntos de la cuenca, revela resultados poco favorables (Anexo II).

En Chirimachay, también se obtuvo el mejor ajuste mediante la consideración de QP2 como principal fuente de alimentación de esta cuenca, sin embargo, los coeficientes de eficiencia están por debajo de 0.5, inclusive siendo NSE un valor negativo (-0.12‰). El tiempo de tránsito promedio reportado es de 38.10 semanas para un periodo de estudio igual al de la cuenca de QQ12, sin embargo, KGE y NSE no son igual de elevados, por lo que es necesario considerar las condiciones de flujo y geográficas de la cuenca.

Para el caso de Dos Chorreras el periodo de estudio es distinto al resto de las 4 cuencas, este va desde abril 2015-abril 2018. El tiempo de tránsito promedio para esta

cuenca es de 50.42 semanas, es decir, 13 meses aproximadamente. El ajuste de esta cuenca fue uno de los mejores en el periodo mayo 2016- julio 2016, en comparación al resto de puntos de caudal analizados, presentando un KGE y NSE de 0.86 y 0.69 respectivamente.

Las cuencas como Matadero y Virgen del Cajas fueron ajustadas con otro punto de precipitación, tal como, Chirimachay (QP3). La figura 20a muestra que para QQ2 el ajuste es mejor y esto se ve reflejado en los resultados de KGE y NSE (Ver tabla 5), mientras que para matadero los valores de los coeficientes de eficiencia reportados son bajos en comparación con este punto. El MTT para matadero es 41.40 semanas, siendo mayor aproximadamente 7 semanas.



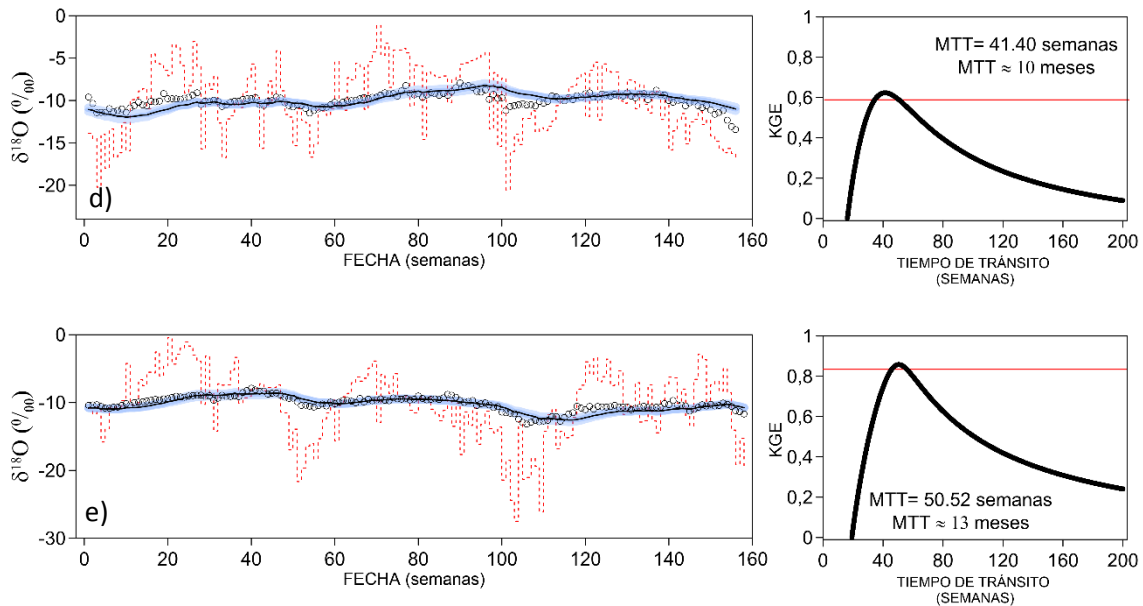
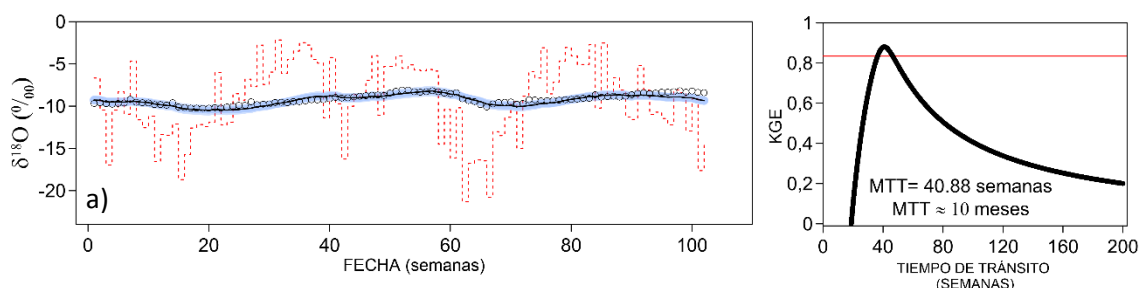


Figura 21: Simulación de tiempos de tránsito promedio con coeficiente de eficiencia respectivo, a) QQ12, b) Virgen del Cajas, c) Chirimachay, d) Matadero, e) Dos Chorreras

3.6.2. Lagunas

Se analizaron 2 puntos determinados como puntos de lagunas, tales como Toreadora y Caballo Shayana, la comparación entre la señal isotópica revela una diferencia entre desviaciones estándar de 1.57 (Ver tabla 5), por lo que las concentraciones de la señal de salida o de caudal no son parecidas a las de Toreadora. Tras haber determinado la principal fuente de alimentación de la laguna Toreadora, tal como, QP1, se obtuvo un KGE y NSE de 0.88 y 0.73 respectivamente. El tiempo de tránsito promedio resultante de este ajuste es de 40.88 semanas.

La laguna Caballo Shayana tuvo un ajuste diferente debido a las diversas condiciones a los que está sometido este punto de monitoreo. El MTT resultante fue de 12.17 semanas, es decir, 3 meses aproximadamente. La función de entrada para obtener los coeficientes de eficiencia reportados en la tabla 5, está basada en la concentración isotópica de QP3.



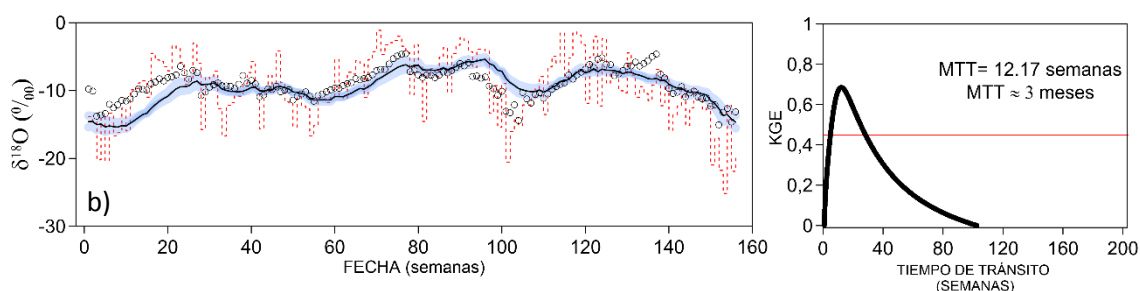


Figura 22: Simulación de tiempos de tránsito promedio con coeficiente de eficiencia respectivo para lagunas, a) Laguna Toreadora, b) Laguna Caballo Shayana.

3.6.3. Relación cobertura-tiempos de tránsito

La figura 23, presenta las relaciones existentes entre el tiempo de tránsito y las diferentes coberturas que se encuentran en el área de estudio (Tabla 1). No se encontró relación significativa entre cobertura de Bosque natural, almohadillas, arbustos y pajonal, ya que se reportan coeficientes de determinación bajos (<0.3) y no se halla significancia entre ellos.

Tabla 6: Coeficientes de correlación entre MTT y cobertura vegetal.

SITIO	MTT	BN	ALM	PAJ	PAS	PPINO	ARB	LAG
QQ12	23.01	2.97	8.17	76.73	0.00	0.00	3.47	8.34
QQ2	34.41	3.79	8.89	75.17	0.99	1.03	3.49	6.25
QQch	50.42	4.14	8.87	76.06	2.07	1.24	3.99	3.25
QQ3	38.1	5.66	7.99	74.79	3.04	1.41	4.33	2.60
QQ4	41.4	7.40	8.17	71.74	3.94	1.24	4.81	2.36
PEARSON		0.45	0.39	-0.32	0.65	0.82	0.54	-0.82
R ²		0.20	0.15	0.10	0.43	0.68	0.30	0.78
TIPO DE CORRELACIÓN		positiva débil	positiva débil	negativa débil	positiva moderada fuerte	positiva moderada fuerte	positiva moderada fuerte	negativa moderada fuerte

Descripción: BN, bosque natural; ALM, almohadillas; PAJ, pajonal; PAS, pasto; PPINO, plantaciones de pino; ARB, arbustos y musgos; LAG, lagunas estacionales y permanentes.

La relación entre la cobertura de pasto y MTT presenta un R^2 de 0.67, mientras que para la cobertura de lagos estacionales y permanentes se estima un R^2 de 0.78 y un valor $p < 0.05$ (Tabla 6).

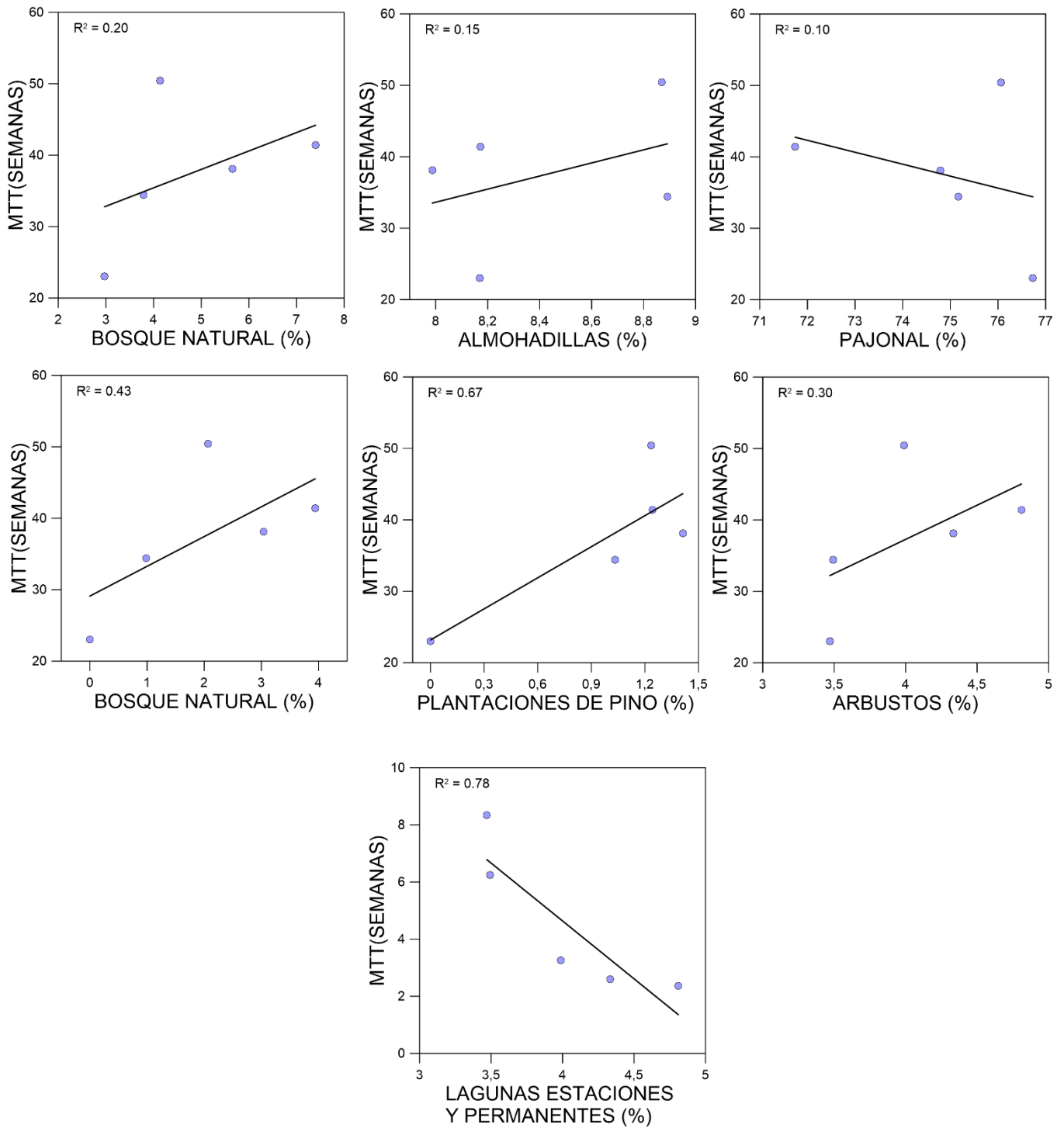


Figura 23: Correlación entre MTT y cobertura vegetal

La pendiente también fue relacionada con la porción de área que ocupa dentro de cada cuenca monitoreada, estimándose mejores coeficientes de determinación, especialmente para las áreas con pendientes de 40-60%. La tabla 8 indica todos los coeficientes de correlación (R^2 y Pearson) estimados entre las áreas que cubre cada una de las pendientes.

Tabla 7: Coeficientes de correlación

SITIO	MTT	0-20	20-40	40-60	>60
QQ12	23.01	0.36	0.30	0.21	0.21
QQ2	34.41	0.31	0.29	0.20	0.19
QQch	50.42	0.28	0.30	0.28	0.32
QQ3	38.1	0.21	0.23	0.24	0.31
QQ4	41.4	0.21	0.23	0.24	0.32
PEARSON		-0.62	-0.24	0.88	0.77
R^2		0.39	0.06	0.77	0.59
Tipo de correlación		Negativa fuerte moderada	Negativa débil	Positiva moderada fuerte	Positiva moderada fuerte

En comparación a las correlaciones entre cobertura vegetal y las correlaciones mostradas en la figura 24, las regresiones lineales se definen de mejor manera para todos los puntos monitoreados.

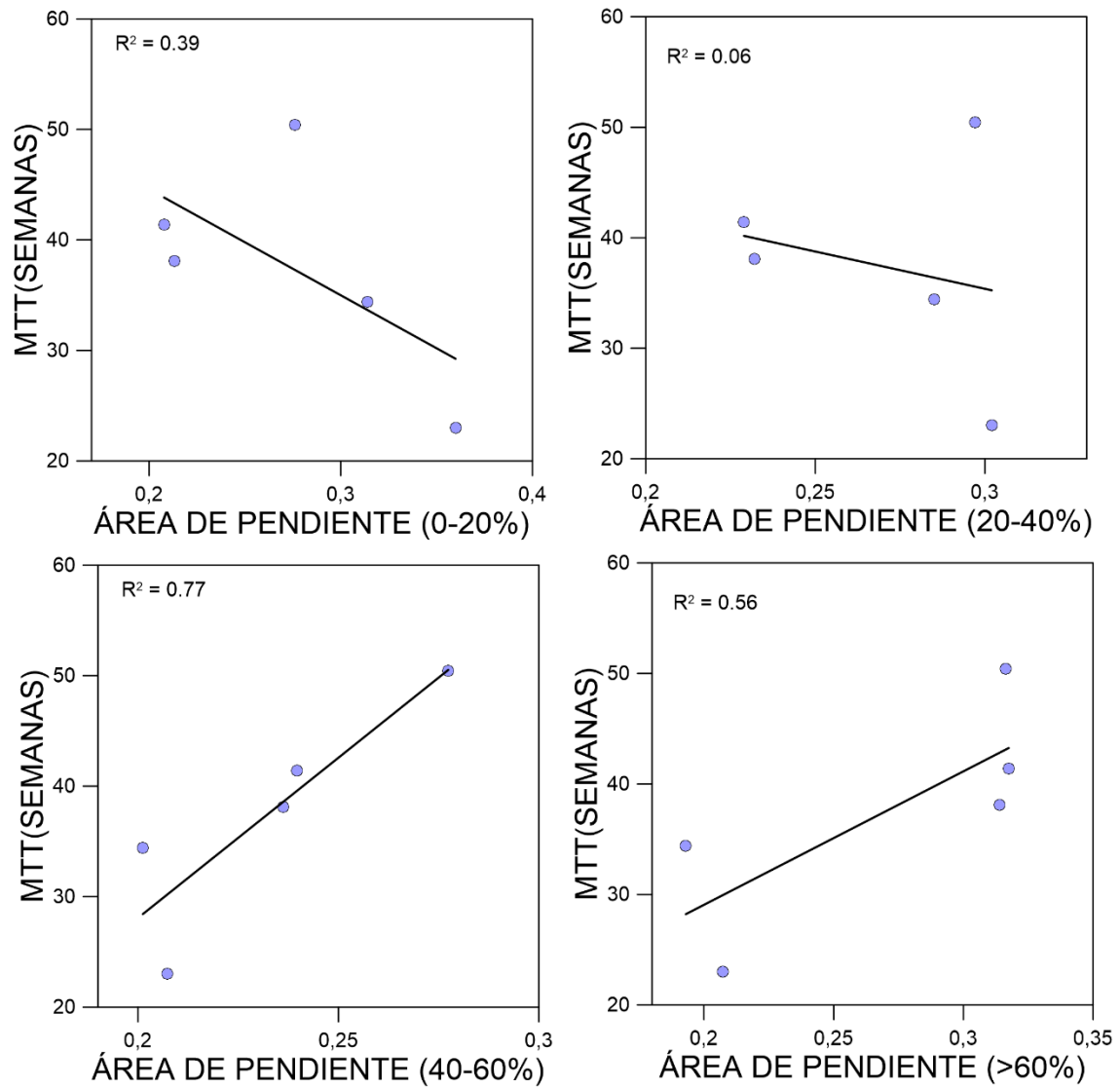


Figura 24: Correlación entre área de pendiente y MTT

4. DISCUSIÓN

4.1. Caracterización espacial y temporal de la señal isotópica

4.1.1. Precipitación

Tanto el $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$, resultan ser altamente sensibles a los factores físicos, como altitud, geografía local, cantidad de lluvia, entre otros (Yang, Mu, Guo, Bao, & Delgado, 2019). Algunos estudios (p.e., Conroy, Cobb, & Noone, 2013; Pourrut, 1983; Welker, 2012) aseguran que fenómenos meteorológicos como el fenómeno del niño alteran de manera significativa la cantidad de lluvia que llega a una región. Esto puede sugerir una relación directa entre la fuerza del fenómeno y la concentración isotópica de la precipitación. En la Figura 3, es posible definir como periodo húmedo a los meses de abril, mayo y junio, debido a que la cantidad de lluvia sobrepasa los 100 mm mensuales, patrón que se repite en cada año monitoreado. Este comportamiento de la precipitación influye en su concentración isotópica, puesto que se muestra enriquecida, mientras que los picos de concentraciones isotópicas más empobrecidas se definen en los meses de julio, agosto, septiembre y octubre, en los que la lluvia es baja (<100 mm), estableciéndose como periodo seco. Estas variaciones en las concentraciones, así como la cantidad de lluvia, establece una conducta bimodal de la precipitación dentro de la cuenca, al igual que un comportamiento isotópico estacional.

La comparación realizada con GMWL establecida por Craig (1961), no señala una variación significativa en relación a la pendiente, mientras que la intersección de d-excess, se encuentra por encima de lo establecido (6.7‰). Valores similares fueron encontrados en la microcuenca del río Zhurucay (Ecuador) y Chirripó (Costa Rica); no obstante, en Zhurucay, el valor de la pendiente es mayor con 0.08‰, mientras que en Chirripó, presenta el mismo valor, con respecto a la pendiente obtenida en este estudio (Esquivel-Hernández, Mosquera, et al., 2018; Mosquera, Céleri, et al., 2016). Gracias a los análisis de las trayectorias de las masas de aire, se argumenta que estas variaciones son debido a que los procesos de evaporación dentro del sistema se producen en equilibrio. Las fluctuaciones marcadas de la intersección de d-excess indica procesos de re-evaporación al ser sometidas a gradientes térmicos distintos o diferentes fuentes de alimentación de precipitación. De esta manera se sugiere que las corrientes de aire pueden tener origen en el océano Pacífico, Amazonas y Caribe (Esquivel-Hernández, Mosquera, et al., 2018; Sánchez-Murillo et al., 2017).

Las 3 zonas monitoreadas, tienen una diferencia altitudinal de 315 m s.n.m aproximadamente, originando un empobrecimiento o enriquecimiento de 0.36‰. Ciertos estudios, (p.e., McGuire & McDonnell, 2006; Tappa, 2013) declaran que la

variación de concentración de $\delta^{18}\text{O}$ por cada 100m debe encontrarse entre valores de -0.15‰ a -0.5‰, ya que el proceso de evaporación-condensación de las moléculas de agua enriquecidas son más rápidos y frecuentes, mientras que el vapor de agua con concentraciones isotópicas empobrecidas son sometidas a procesos de enfriamiento adiabáticos, bajando más las concentraciones, provocando diferencias correlacionadas con la elevación.

4.1.2. Caudales

El efecto altitudinal también se ve reflejado en la concentración isotópica de los caudales, sin embargo, el rango de variación de $\delta^{18}\text{O}$ no es tan pronunciado como la señal de precipitación. Los caudales que se encuentran por encima de una elevación de 3632 m s.n.m. están desfasados -0.5‰ con respecto al resto de caudales que se encuentran por debajo de esta. Como consecuencia, se establece una relación con las distintas masas de aire que atraviesan estos sectores. De acuerdo con Esquivel-Hernández et al., (2018) y Salas-Navarro et al., (2018), este fenómeno se produce por la influencia de masas de aire provenientes de la Amazonía, confirmando una concentración de $\delta^{18}\text{O}$ diferente al resto de caudales que pueden ser alimentados por corrientes de aire provenientes del Pacífico. La atenuación de la señal caudal que se muestra en la figura 5 revela el mismo comportamiento que presenta la cuenca del río Zhurucay, puesto que las moléculas de agua, al ingresar al sistema, dejan de estar expuestas a los procesos evaporativos y se mezclan con agua almacenada de eventos anteriores (Mosquera, Céleri, et al., 2016; Mosquera, Segura, et al., 2016). El tipo de suelo de ambas cuencas estudiadas es similar, razón por la cual el resultado que se obtiene es comparativo.

La figura 5 a pesar de mostrar una atenuación significativa de la señal de caudal en relación a la señal de precipitación, si se presenta respuesta a los periodos húmedos más que a los secos. Los puntos de recarga de caudal, en época húmeda alcanzan su punto máximo de saturación, dejando salir el agua almacenada de eventos anteriores y generando mayor escorrentía con agua nueva, proveniente del evento actual. Es importante mencionar, que la cantidad de lluvia varía de manera considerable cada periodo húmedo, debido a que las condiciones de la cuenca no son estables (Kirchner, 2016).

4.1.3. Manantiales

La firma isotópica de los puntos monitoreados es parcialmente plana, los picos alternados que se presentan coinciden con el periodo lluvioso, sin embargo, el sistema vuelve a equilibrarse y la señal se atenúa nuevamente. Esta respuesta se debe al

ingreso de grandes cantidades de agua (>150 mm) que saturan el acuífero. Esto es corroborado por uno de los estudios realizados en Escocia, en los que se concluye que los acuíferos extensos, no muestran una variación estacional y se da una mezcla perfecta de las fuentes de alimentación (Rodgers et al., 2005). De acuerdo con Correa et al., (2017), los manantiales tienen un aporte representativo en los caudales de las zonas altas de los páramos, siendo las aguas subterráneas poco profundas fundamentales para la generación de escorrentía.

4.1.4. Transectos

El comportamiento isotópico también fue analizado en diferentes profundidades del suelo y con cobertura vegetal variable. Para QT1, referente a cobertura de pajonal y suelos andosoles, muestra una respuesta inmediata a los 2 periodos de precipitación. Los horizontes orgánicos (10-35cm) presentan mayor similitud entre sus señales, en relación con el horizonte mineral (75cm). Esta respuesta inmediata puede deberse al tipo de suelo y a su estado de saturación. De acuerdo con Tenelanda, Crespo, & Mosquera, (2018), los suelos andosoles, ya se encuentran saturados por la humedad relativa de la zona y al ser expuestos a eventos de precipitación menores a 10mm, se da la generación de escorrentía inmediata. Generalmente estos tipos de suelo se localizan en laderas, por lo que la pendiente del lugar analizado también juega un papel fundamental en el proceso de generación de flujo subsuperficial.

Esta conducta también es replicada en QT3, para la parte alta, media y baja, referente a pino y pasto, así como en QT2 en la parte alta y baja. A pesar de que la cobertura vegetal para ambos transectos es diferente, no se muestran diferencias significativas en las firmas isotópicas. En la parte media del QT2, la señal isotópica presenta una atenuación mayor a 1‰, esto sugiere que en esta parte la humedad del suelo alcanza valores altos ($>60\%$), ligado a la predominancia de musgos que cubren los suelos. De acuerdo con Nguyen, Heidbüchel, Meyer, Merz, & Apel, (2017), las variaciones en la concentración isotópica está controlada por regímenes de humedad, puesto que están relacionados a los procesos evaporativos de los cuerpos de agua. Al comparar las figuras 8b y 15b, se observa una similitud en sus pendientes, siendo posible que QSW2 alimente únicamente esta zona de la ladera.

4.1.5. Lagunas

En la figura 9, se puede observar que la atenuación de la laguna Toreadora es similar a la de los caudales, mientras que LCS presenta una tendencia similar a la precipitación. Este comportamiento puede ser atribuido a las condiciones de conservación del área en la que se encuentran las lagunas y/o al tiempo de residencia

del agua lluvia dentro del área, controlado por sus pendientes promedio. En Costa Rica, se analizaron 30 lagos de origen glacial, de los cuales 2 presentan esta similitud en la señal, mientras que los restantes muestran procesos de re-evaporación, cambiando la composición de la concentración (Esquivel-Hernández, Sánchez-Murillo, et al., 2018). De acuerdo con Ramón, (2018), las lagunas tienen aporte de aguas subterráneas poco profundas, por lo que se puede sugerir que hay una mezcla con el agua de las lagunas, produciéndose la atenuación de la señal.

Cabe recalcar que LCS ha sido intervenida por acción antrópica, puesto que la vía principal atraviesa la zona, obligando a canalizar el flujo de salida del cuerpo de agua mediante un vertedero. Este tipo de medida obliga a salir cierta cantidad de agua de manera rápida y constante.

4.2. Tiempos de tránsito promedios

La disminución de la amplitud de $\delta^{18}\text{O}$ de todos los puntos de caudal analizados con respecto a la precipitación, se liga directamente con los tiempos de tránsito que posee cada cuenca, como menciona Esquivel-Hernández, Sánchez-Murillo, et al., (2018). Una cuenca hidrológica está caracterizada por un tiempo de distribución (TTD), por ende, por un tiempo de tránsito promedio (MTT), denotando sus velocidades respectivas a lo largo de la cuenca. Ambos tiempos se pueden ver afectados por diferentes características topográficas y geomorfológicas, tal es el caso de Asano & Uchida, (2012) quienes concluyeron en su estudio, que la concentración isotópica aumenta de acuerdo a la longitud y el gradiente de la pendiente, generando un incremento en el MTT.

En las 5 cuencas monitoreadas, no se muestra correlación de los tiempos de tránsito calculados con las pendientes promedio de cada una de las zonas de estudio. Sin embargo, tras haber realizado una categorización de acuerdo a un rango de pendientes determinado (Tabla 1) y la definición del área correspondiente a esta, se obtienen resultados similares encontrados por Asano & Uchida, (2012). Para el caso de la cuenca de Dos Chorreras, su tiempo de tránsito es de 1 año aproximadamente y su pendiente media es de 46.9%. Si comparamos el área correspondiente a cada pendiente categorizada de la cuenca con QQ12 (MTT $\approx$ 6 meses), notamos que ambas tienen la misma área perteneciente a un rango de 0-20%, no obstante, QQ12, tiene un área total de 13.31 km² y Dos Chorreras presenta un área de 45.82 km². Por esta razón, el tiempo de tránsito para QQ12 es menor, a pesar de que la pendiente media también sea menor, referentemente a Dos Chorreras. Estudios como McGlynn et al., (2003), realizado en Maimai (Nueva Zelanda) determinan que la estimación de MTT

está relacionado con el área de la cuenca. Este estudio analiza un área caracterizada por mostrar poca estacionalidad, humedad uniforme durante todo el año y pendientes similares a nuestra zona de estudio. Por lo que los resultados obtenidos son válidos.

Con respecto a la cobertura vegetal, no se halla una relación significativa entre los parches de bosque natural, almohadillas y pajonal, no obstante estudios como Timbe et al., (2014), determinan correlaciones significativas al cambio de uso de suelo. La diferencia de resultados obtenidos puede deberse al área de cada cuenca monitoreada y a los tipos de suelos predominantes en la zona (histosol, cambisol, regosol, stagnosoles).

Dentro del análisis de diferentes tipos de cobertura con los tiempos de tránsito promedios, se encontró una correlación negativa fuerte entre lagunas permanentes y estacionales, revelando que el tiempo de tránsito de una cuenca está influenciado por el número de cuerpos de agua de este tipo. La correlación establece que entre mayor número de lagos y lagunas exista en la zona, menor va a ser el tiempo de tránsito. Este efecto sugiere que la dinámica de la capa móvil de agua de las lagunas estimula la salida del recurso hídrico retenido por los histosoles, alimentando así los caudales de manera inmediata.

4.3. Conceptualización del funcionamiento hidrológico

Considerando todos los resultados obtenidos, se puede determinar que el agua que proviene de los distintos eventos de precipitación infiltra totalmente por los horizontes orgánicos de los andosoles (10cm-35cm), los cuales están previamente saturados. Así como también una parte del agua de estos eventos, infiltra hasta la capa más profunda (75cm), generando un efecto pistón en toda la ladera. Gracias a la pendiente del área y al efecto de gravedad, el agua fluye rápidamente por los horizontes orgánicos hasta alimentar las zonas bajas, en donde se encuentran los histosoles. De acuerdo con Ramón, (2018), los responsables de la regulación hídrica en las zonas de páramo son los suelos histosoles en un 60%, al igual que los suelos andosoles son la principales fuente de alimentación de estos, resultados similares encontrados por Pesántez et al., (2018).

Los suelos histosoles al encontrarse en las zonas bajas y planas, tienen contacto directo con lagunas permanentes y estacionales, lo que genera un aporte evidente desde los suelos al flujo superficial de estos cuerpos de agua. Al presentarse una relación estrecha entre los MTT y la laguna monitoreada, se puede sugerir que durante todo el año el agua superficial tiene velocidades de flujo altas. Consecuente a esto, se genera un efecto de vacío, lo que se refleja en menor tiempo de residencia de agua en

los histosoles. Un análisis anual de los tiempos de tránsito de laguna puede sugerir una autorregulación del sistema, ya que en época seca el tiempo de tránsito tiende a aumentar, mientras que en periodos húmedos el MTT se reduce.

Cuando las lagunas se hallan intervenidas, como es el caso de LCS, el tiempo de tránsito no tiende a cambiar y es muy corto (<12 semanas), debido a que la salida de agua es regulada por vertederos. Este tipo de acción altera la autorregulación del sistema durante los diferentes periodos del año, provocando caudales muy altos en épocas húmedas o bajos niveles de agua en época de estiaje.

Las dimensiones de la laguna también juegan un rol fundamental en el proceso de mezcla, debido a que la capa superficial de este cuerpo de agua presenta una velocidad diferente a las capas más profundas. De esta manera el agua nueva que ingresa no tiene un contacto total con el agua almacenada, por lo que se evidencia una respuesta rápida a los periodos húmedos y secos.

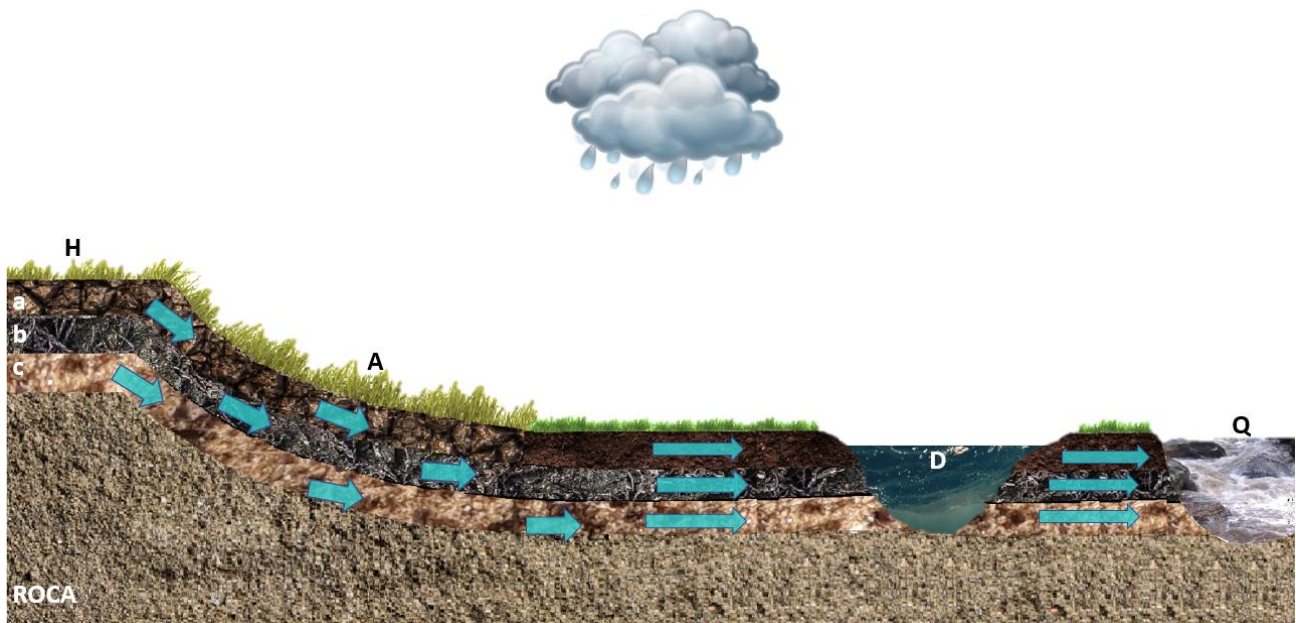


Figura 25: Conceptualización de la cuenca del río Quinuas. H, suelos histosoles; A, suelos andosoles; a y b, horizontes orgánicos; c, horizonte mineral; D, flujo móvil de laguna; Q, caudal

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los trazadores resultan ser una buena herramienta para determinar el funcionamiento integral de cuencas hidrográficas y la combinación de esta técnica con modelos de caja negra, son capaces de generar modelos conceptuales específicos. Los trazadores ambientales como, $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$, al ser conservativos, permiten obtener información pertinente de los procesos de fraccionamiento isotópico, definiendo un mapa de comportamiento de flujo dentro de una cuenca de estudio. A pesar de que la mayoría de las investigaciones han sido aplicadas a áreas de estudio menores a 10 km^2 , es necesario replicarlos a meso-escala, debido a la importancia del ecosistema.

Los suelos Andosoles juegan un papel fundamental en la generación de escorrentía superficial y subsuperficial, ya que su estructura y pendiente influye en el tiempo de retención de agua, siendo este muy corto. Gracias a este efecto presentado por los andosoles se puede recargar las zonas bajas, en las que se encuentran histosoles, lagunas y manantiales. Todos estos, poseen la capacidad de almacenar cantidades considerables de agua, por lo que la firma isotópica presentada es más atenuada que la precipitación. Existe una variación relevante en el periodo abril 2017-junio 2017, debido a la entrada de una cantidad de precipitación mayor a la habitual, siendo necesario un análisis meteorológico más detallado para este periodo.

Tanto la pendiente de la zona como el área que cubre cada una de estas, tiene una alta influencia sobre el tiempo de tránsito de cada una de las cuencas monitoreadas, más que la extensión total del área de estudio. Las zonas que presentan pendientes menores a 40% son fundamentales para el almacenamiento y regulación del recurso hídrico, ya que, por lo general, los suelos que se hallan dentro de este rango poseen alto contenido orgánico y alta porosidad.

Las lagunas que conforman el sistema, al aumentar el tiempo de tránsito, perturban el almacenamiento de agua de los suelos histosoles. El flujo rápido de la capa móvil de agua de la laguna puede generar efecto de vacío, haciendo que el agua de las zonas bajas salga de mayor rapidez. Sin embargo, el sistema hidrológico es capaz de regular este comportamiento en épocas secas y húmedas. Al intervenir las lagunas, se altera el tiempo de retención de agua de los suelos histosoles en los 2 periodos antes mencionados, por lo que se extrae mayor cantidad del recurso. Es necesario analizar las concentraciones isotópicas a diferentes profundidades de estos cuerpos de agua, para describir condiciones de mezcla de forma más específica. Así como también ampliar el monitoreo

6. BIBLIOGRAFÍA

- Capell, R., Tetzlaff, D., Hartley, A. J., & Soulsby, C. (2012). Linking metrics of hydrological function and transit times to landscape controls in a heterogeneous mesoscale catchment. *Hydrological Processes*, 26(3), 405–420. <https://doi.org/10.1002/hyp.8139>
- Carrillo, G., Silva, B., Córdova, M., Célleri, R., & Bendix, J. (2016). Dynamic Mapping of Evapotranspiration Using an Energy Balance-Based Model over an Andean Páramo Catchment of Southern Ecuador. <https://doi.org/10.3390/rs8020160>
- Carrillo, G., Silva, B., Rollenbeck, R., Célleri, R., & Bendix, J. (2019). Agricultural and Forest Meteorology The breathing of the Andean highlands: Net ecosystem exchange and evapotranspiration over the páramo of southern Ecuador. *Agricultural and Forest Meteorology*, 265(March 2018), 30–47. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.11.006>
- Célleri, R., & Feyen, J. (2009). The Hydrology of Tropical Andean Ecosystems: Importance, Knowledge Status, and Perspectives. *Mountain Research and Development*, 29(4), 350–355. <https://doi.org/10.1659/mrd.00007>
- Clark, I. (2015). *Groundwater Geochemistry and Isotopes*. Boca Raton.
- Conroy, J. L., Cobb, K. M., & 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. <https://doi.org/10.1002/jgrd.50412>
- Correa, A., Windhorst, D., Tetzlaff, D., Crespo, P., Célleri, R., Feyen, J., & Breuer, L. (2017). Temporal dynamics in dominant runoff sources and flow paths in the Andean Páramo. *Water Resources Research*, 53(7), 5998–6017. <https://doi.org/10.1002/2016WR020187>
- Craig, H. (1961). Isotopic Variations in Meteoric Waters. *Science*, 133(3465), 1702–1703.
- Crespo, P. J., Lazo, P. X., Mosquera, G. M., & Cárdenas, I. L. (2011). Identificación de las principales fuentes de agua que aportan a la generación de esorrentía en zonas de páramo húmedo: mediante el uso de Deuterium y Oxygen-18. César Vásquez (Coordinador), 798–814.
- Cuenca, K., & César, C. (2012). GEOLOGÍA DEL ECUADOR, SIERRA.

- Cuesta, F., & De Bievre, B. (2008). Temperate Grasslands of South America.
- Dawson, T., Mambelli, S., Plamboeck, A., Templer, P., & Tu, K. (2002). STABLE ISOTOPES IN PLANT ECOLOGY. *Journal of Information Science and Engineering*, 22(5), 1015–1031. <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.33.020602.095451>
- De Bièvre, B., Iñiguez, V., & Buytaert, W. (2008). Hidrología del páramo. *Investigaciones Biofísicas En El Páramo*, 1–15.
- Echavarria, M. (2004). *The impacts of payments for watershed services in Ecuador: emerging lessons from Pimampiro and Cuenca*. International Institute for Environment and Development, Environmental Economics Programme.
- Esquivel-Hernández, G., Mosquera, G., Sánchez-Murillo, R., Quesada-Román, A., Birkel, C., Crespo, P., ... Windhorst, D. (2018). MOISTURE TRANSPORT AND SEASONAL VARIATIONS IN THE STABLE ISOTOPIC COMPOSITION OF RAINFALL IN CENTRAL AMERICAN AND ANDEAN 3 PÁRAMO DURING EL NIÑO CONDITIONS (2015-2016). *Hydrological Processes*.
- Esquivel-Hernández, G., Sánchez-Murillo, R., Quesada-Román, A., Mosquera, G., Birkel, C., & Boll, J. (2018). Insight into the stable isotopic composition of glacial lakes in a tropical alpine ecosystem: Chrripó, Costa Rica. *Hydrological Processes*, (September). <https://doi.org/10.1002/hyp.13286>
- Frisbee, M. D., Phillips, F. M., Campbell, A. R., Hendrickx, J. M. H., & Engle, E. M. (2010). Modified passive capillary samplers for collecting samples of snowmelt infiltration for stable isotope analysis in remote, seasonally inaccessible watersheds 2: Field evaluation. *Hydrological Processes*, 24(7), 834–849. <https://doi.org/10.1002/hyp.7524>
- Gupta, H. V, Kling, H., Yilmaz, K. K., & Martinez, G. F. (2009). Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria : Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, 377(1–2), 80–91. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.08.003>
- Hofstede, R., Coppus, R., Váscenez, P. M., Segarra, P., & Wolf, J. (2002). The conservation status of tussock grass paramo in Ecuador, (May 2014).
- Hofstede, R., Segarra, P., & Mena, P. (2003). Los Páramos del Mundo. Retrieved from [http://www.portalces.org/sites/default/files/references/038_Hofstede et al. %20eds%202003.Los Paramos del Mundo.pdf](http://www.portalces.org/sites/default/files/references/038_Hofstede%20et%20al.%202003.Los%20Paramos%20del%20Mundo.pdf)

- Jacobs, S. R., Timbe, E., Weeser, B., Rufino, M. C., Butterbach-Bahl, K., & Breuer, L. (2018). Land use alters dominant water sources and flow paths in tropical montane catchments in East Africa, (February), 1–32. <https://doi.org/10.5194/hess-2018-61>
- Kirchner, J. W. (2016). Aggregation in environmental systems – Part 1: Seasonal tracer cycles quantify young water fractions , but not mean transit times , in spatially heterogeneous catchments, 279–297. <https://doi.org/10.5194/hess-20-279-2016>
- Lazo, P. X., Mosquera, G. M., McDonnell, J. J., & Crespo, P. (2019). The role of vegetation, soils, and precipitation on water storage and hydrological services in Andean. *Journal of Hydrology*. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.03.050>
- Llambí, L., Soto, A., Celleri, R., De Bievre, B., Ochoa, B., & Borja, P. (2012). *Ecología, hidrología y suelos de páramos. Proyecto Páramo Andino*. Retrieved from file:///C:/Users/GI1/Documents/Downloads/Ecologia_Hidrologia_y_Suelos_del_Páramo.pdf
- Maloszewski, P., & Zuber, A. (1993). Principles and practice of calibration and validation of mathematical models for the interpretation of environmental tracer data in aquifers. *Advances in Water Resources*, 16, 173–190.
- Maza, A. (2016). *Estudio Comparativo entre Modelos de Estimación de Radiación Solar y Déficit de Presión de Vapor en dos Gradientes Altitudinales*. Universidad de Cuenca.
- McDonnell, J. J., McGuire, K., Aggarwal, P., Beven, K. J., Biondi, D., Destouni, G., ... Wrede, S. (2010). How old is streamwater? Open questions in catchment transit time conceptualization, modelling and analysis. *Hydrological Processes*, 24(12), 1745–1754. <https://doi.org/10.1002/hyp.7796>
- McGlynn, B., McDonnell, J., Stewart, M., & Seibert, J. (2003). On the relationships between catchment scale and streamwater mean residence time. *Hydrological Processes*, 17(1), 175–181. <https://doi.org/10.1002/hyp.5085>
- McGuire, K. J., & McDonnell, J. J. (2006). A review and evaluation of catchment transit time modeling. *Journal of Hydrology*, 330(3–4), 543–563. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.04.020>
- Mook, W. G. (2002). *Isótopos ambientales en el ciclo hidrológico: principios y aplicaciones*. Retrieved from <http://books.google.com.mx/books?id=vp8lF9WqjjkC>

- Mosquera, G., Céleri, R., Lazo, P. X., Vaché, K. B., Perakis, S. S., & Crespo, P. (2016). Combined use of isotopic and hydrometric data to conceptualize ecohydrological processes in a high-elevation tropical ecosystem. *Hydrological Processes*, 30(17), 2930–2947. <https://doi.org/10.1002/hyp.10927>
- Mosquera, G., Lazo, P., Cárdenas, I., & Crespo, P. (2012). Identification of the main water sources that contribute to the generation of runoff in Andean páramo zones: using the stable isotopes deuterium ($\delta^2\text{H}$) and oxygen- 18 ($\delta^{18}\text{O}$). *Maskana*, 3(2), 87–105.
- Mosquera, G. M., Lazo, P. X., Céleri, R., Wilcox, B. P., & Crespo, P. (2015). Runoff from tropical alpine grasslands increases with areal extent of wetlands. *Catena*, 125, 120–128. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.10.010>
- Mosquera, G., Segura, C., Vaché, K. B., Windhorst, D., Breuer, L., & Crespo, P. (2016). Insights into the water mean transit time in a high-elevation tropical ecosystem. *Hydrology and Earth System Sciences*, 20(7), 2987–3004. <https://doi.org/10.5194/hess-20-2987-2016>
- Muñoz-Villers, L. E., Geissert, D. R., Holwerda, F., & McDonnell, J. J. (2016). Factors influencing stream baseflow transit times in tropical montane watersheds. *Hydrology and Earth System Sciences*, 20(4), 1621–1635. <https://doi.org/10.5194/hess-20-1621-2016>
- Muñoz, P., Céleri, R., & Feyen, J. (2016). Effect of the Resolution of Tipping-Bucket Rain Gauge and Calculation Method on Rainfall Intensities in an Andean Mountain Gradient, (1992). <https://doi.org/10.3390/w8110534>
- Musa, B. A., Fränkl, L., Grosjean, M., Tylmann, W., Mosquera, P. V, Hampel, H., & Schneider, T. (2018). Science of the Total Environment A 150-year record of polycyclic aromatic compound (PAC) deposition from high Andean Cajas National Park , southern Ecuador. *Science of the Total Environment*, 621, 1652–1663. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.10.060>
- Nguyen, L. D., Heidbüchel, I., Meyer, H., Merz, B., & Apel, H. (2017). What controls the stable isotope composition of precipitation in the Asian monsoon region? *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, (March), 1–33. <https://doi.org/10.5194/hess-2017-164>
- OIEA. (2014). *Guía para el muestreo de la precipitación OIEA/GNIP*.
- Palacios, D. (2017). *EVALUACIÓN DEL INGRESO Y EXPORTACIÓN DE*

NUTRIENTES EN LA CUENCA DE PÁRAMO ANDINO DEL RÍO QUINUAS.

Universidad de Cuenca.

- Pesántez, J., Mosquera, G., Crespo, P., Breuer, L., & Windhorst, D. (2018). Effect of land cover and hydro-meteorological controls on soil water DOC concentrations in a high-elevation tropical environment. *Hydrological Processes*, 32(17), 2624–2635. <https://doi.org/10.1002/hyp.13224>
- Pourrut, P. (1983). Los climas del Ecuador: fundamentos explicativos. *Centro Ecuatoriano de Investigaciones Geográficas*, 7–41. Retrieved from http://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/divers11-10/21848.pdf
- Quichimbo, P., Tenorio, G., Borja, P., Cardenas, I., Crespo, P., & Celleri, R. (2012). Efectos sobre las propiedades físicas y químicas de los suelos por el cambio de la cobertura vegetal y uso del suelo: {Paramo} de {Quimsacocha} al sur del {Ecuador}. *Suelos Ecuatoriales*, 42(2)(2), 138–153.
- Ramón, J. (2018). *Identificación de fuentes de generación de escorrentía en los Andes tropicales: estudio de múltiples modelos basados en trazadores*.
- Rodgers, P., Soulsby, C., Waldron, S., & Tetzlaff, D. (2005). Using stable isotope tracers to identify hydrological flow paths, residence times and landscape controls in a mesoscale catchment. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 2(1), 1–35. <https://doi.org/10.5194/hessd-2-1-2005>
- Saenz, J. (2015). Observatorio ecohidrológico de Quinuas - Universidad de Cuenca. Retrieved February 25, 2018, from <https://www.ucuenca.edu.ec/la-investigacion/departamentos-investigacion/recursos-hidricos/laboratorios/1627-observatorio-ecohidrológico-de-quinuas>
- Sánchez-Murillo, R., Esquivel-Hernández, G., Sáenz-Rosales, O., Piedra-Marín, G., Fonseca-Sánchez, A., Madrigal-Solís, H., ... Vargas-Víquez, J. A. (2017). Isotopic composition in precipitation and groundwater in the northern mountainous region of the Central Valley of Costa Rica. *Isotopes in Environmental and Health Studies*, 53(1), 1–17. <https://doi.org/10.1080/10256016.2016.1193503>
- Sevink, J., Tonneijck, F., Kalbitz, K., & Cammeraat, L. (2014). Dinámica del carbono en los ecosistemas de páramo de los Andes neotropicales: revisión de literatura sobre modelos y parámetros relevantes. In *Avances en investigación para la conservación de los páramos andinos*.

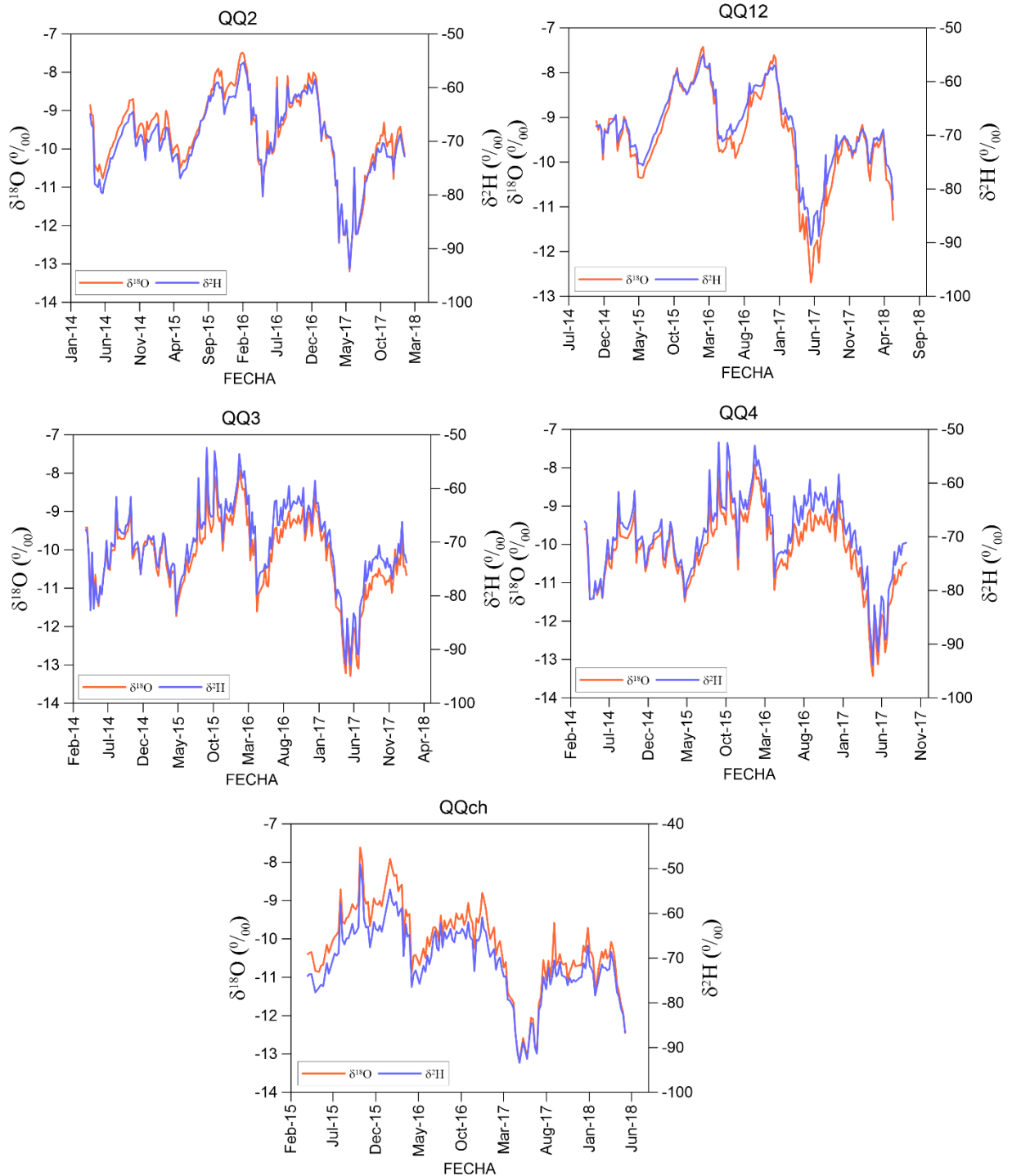
Tappa, D. J. (2013). *Isotopic Composition of Precipitation in a Topographically*. Boise

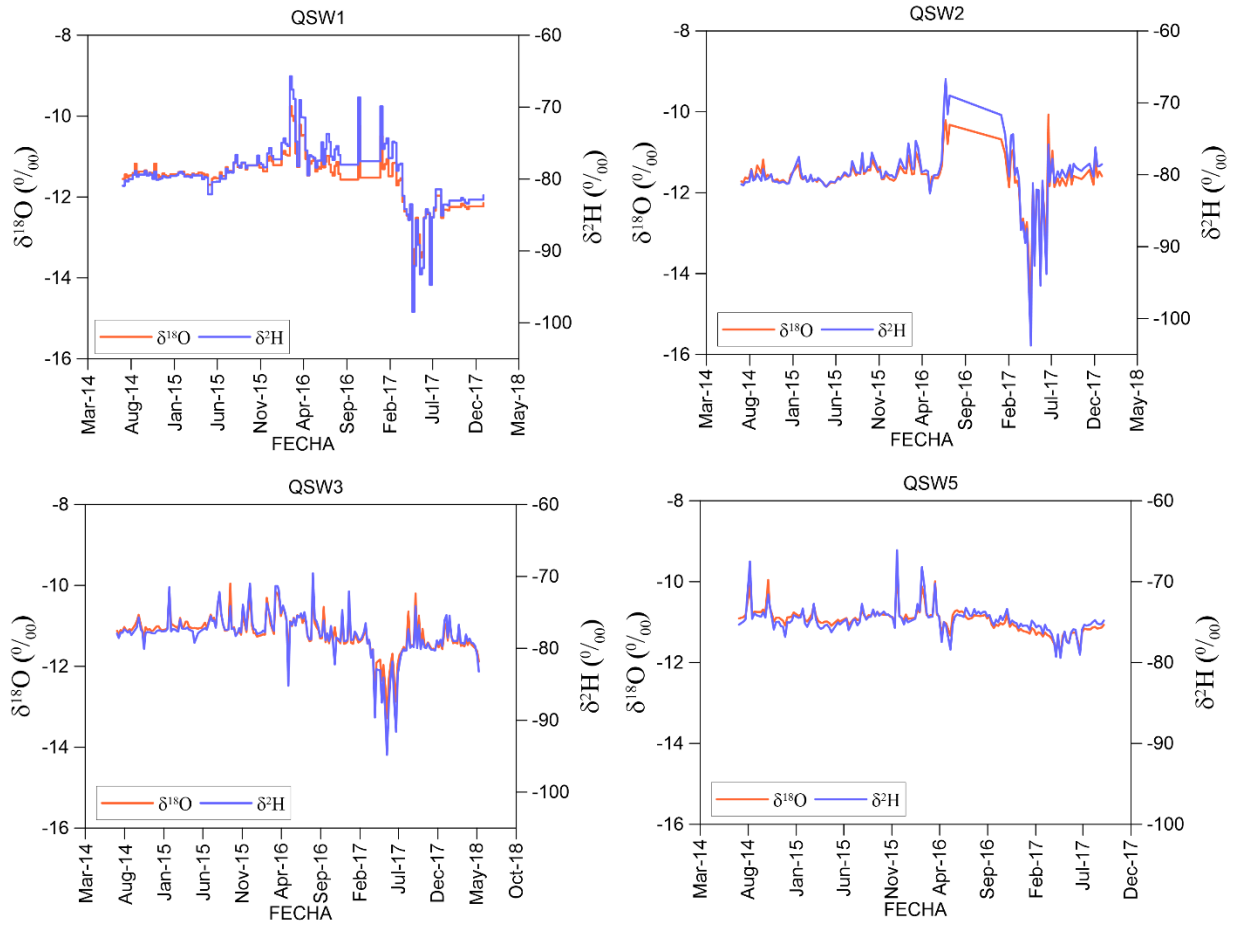
State University.

- Tenelanda, D., Crespo, P., & Mosquera, G. (2018). Umbrales en la respuesta de humedad del suelo a condiciones meteorológicas en una ladera Altoandina. *Maskana*, 9(2), 53–65. <https://doi.org/10.18537/mskn.09.02.07>
- Tetzlaff, D., Carey, S. K., Laudon, H., & Mcguire, K. (2010). Catchment processes and heterogeneity at multiple scales — benchmarking observations , conceptualization and prediction, 2208, 2203–2208. <https://doi.org/10.1002/hyp.7784>
- Tetzlaff, D., Soulsby, C., Waldron, S., Malcolm, I. A., Bacon, P. J., Dunn, S. M., ... Youngson, A. F. (2007). Conceptualization of runoff processes using a geographical information system and tracers in a nested mesoscale catchment, 1307(October 2006), 1289–1307. <https://doi.org/10.1002/hyp>
- Timbe, E., Windhorst, D., Crespo, P., Frede, H. G., Feyen, J., & Breuer, L. (2014). Understanding uncertainties when inferring mean transit times of water trough tracer-based lumped-parameter models in Andean tropical montane cloud forest catchments. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(4), 1503–1523. <https://doi.org/10.5194/hess-18-1503-2014>
- Welker, J. M. (2012). ENSO effects on $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$ and d-excess values in precipitation across the U.S. using a high-density, long-term network (USNIP). *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 26(17), 1893–1898. <https://doi.org/10.1002/rcm.6298>
- Yang, Q., Mu, H., Guo, J., Bao, X., & Delgado, J. (2019). Temperature and rainfall amount effects on hydrogen and oxygen stable isotope in precipitation. *Quaternary International*, (August 2018), 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2019.01.027>

ANEXOS

ANEXO I. Series de tiempo de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$





ANEXO II. Resultados de las modelaciones de tiempos de tránsito promedios de cada una de las cuencas monitoreadas, incluyendo 2 lagunas que conforman la cuenca del río Quinuas.

EXPONENCIAL					
PARÁMETROS	CHIRIMACHAY	DOS CHORRERAS	MATADERO	VIRGEN	QQ12
KGE	0.48	0.86	0.62	0.74	0.86
TT	38.09	50.43	41.40	34.42	23.19
NSE	-0.12	0.69	0.21	0.41	0.71

EXPONENCIAL-PISTÓN					
PARÁMETROS	CHIRIMACHAY	DOS CHORRERAS	MATADERO	VIRGEN	QQ12
KGE	0.48	0.86	0.62	0.74	0.86
TT	35.33	44.75	23.22	21.86	20.41
ETHA	0.93	0.89	0.56	0.64	0.88
NSE	-0.12	0.69	0.21	0.41	0.71

GAMMA					
PARÁMETROS	CHIRIMACHAY	DOS CHORRERAS	MATADERO	VIRGEN	QQ12
KGE	0.81	0.93	0.86	0.84	0.87
TT	198.76	66.13	116.08	50.92	24.94
ALPHA	0.47	0.73	0.56	0.69	0.87
BETA	426.25	90.11	208.89	73.91	28.63
NSE	0.61	0.83	0.72	0.63	0.73

TPLR					
PARÁMETROS	CHIRIMACHAY	DOS CHORRERAS	MATADERO	VIRGEN	QQ12
KGE	0.81	0.93	0.87	0.86	0.88
TTs	130.18	67.31	90.79	98.91	195.73
TTf	1.04	1.70	1.26	6.64	14.41
phi	0.17	0.10	0.15	0.30	0.69
NSE	0.62	0.84	0.73	0.66	0.77

DISPERSIÓN					
PARÁMETROS	CHIRIMACHAY	DOS CHORRERAS	MATADERO	VIRGEN	QQ12
KGE	0.41	0.74	0.51	0.71	0.82
TT	115.60	185.32	131.97	117.43	84.26
Dp	3.99	3.99	4.00	4.00	3.99
NSE	-0.39	0.45	-0.10	0.35	0.64

EXPONENCIAL		
PARÁMETROS	TOREADORA	CABALLO SHAYANNA
KGE	0.88	0.70
TT	40.88	12.17
NSE	0.73	0.30

EXPONENCIAL-PISTÓN		
PARÁMETROS	TOREADORA	CABALLO SHAYANNA
KGE	0.88	0.6852
TT	40.01	8.7726
ETHA	0.98	0.7208
NSE	0.73	0.3008

GAMMA		
PARÁMETROS	TOREADORA	CABALLO SHAYANNA
KGE	0.88	0.82
TT	40.16	34.91
ALPHA	1.02	0.48
BETA	39.27	73.27
NSE	0.73	0.62

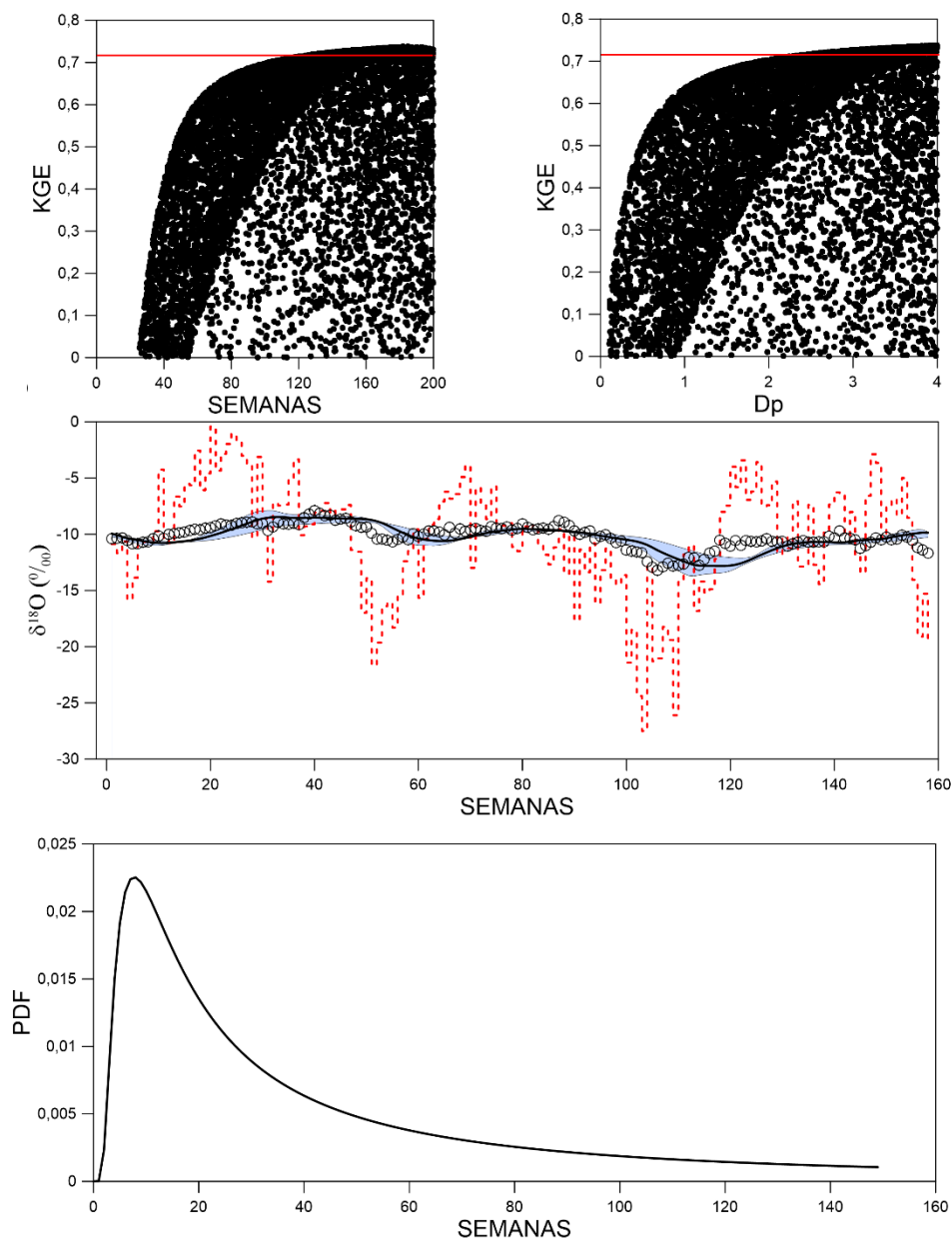
TPLR		
PARÁMETROS	TOREADORA	CABALLO SHAYANNA
KGE	0.88	0.84
TTs	41.11	94.33
TTf	15.82	2.35
phi	0.00	0.49
NSE	0.73	0.66

DISPERSIÓN		
PARÁMETROS	TOREADORA	CABALLO SHAYANNA
KGE	0.76	0.75
TT	181.22	31.66
Dp	3.99	3.99
NSE	0.51	0.44

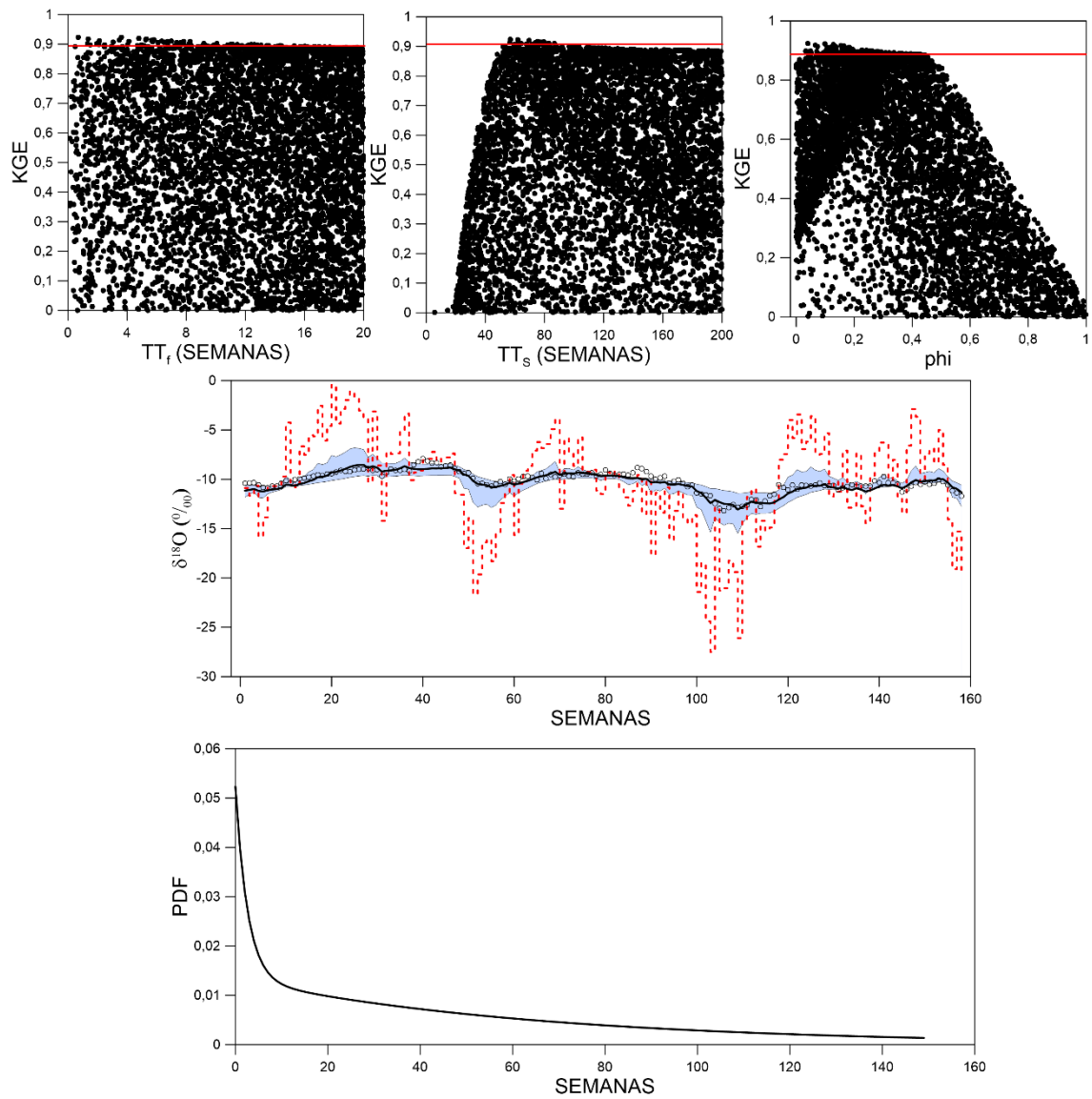
ANEXO III. Simulaciones de tiempos de tránsito promedios con modelos de Dispersión, Gamma, TPLR, Exponencial-Pistón, para cada cuenca monitoreada.

DOS CHORRERAS

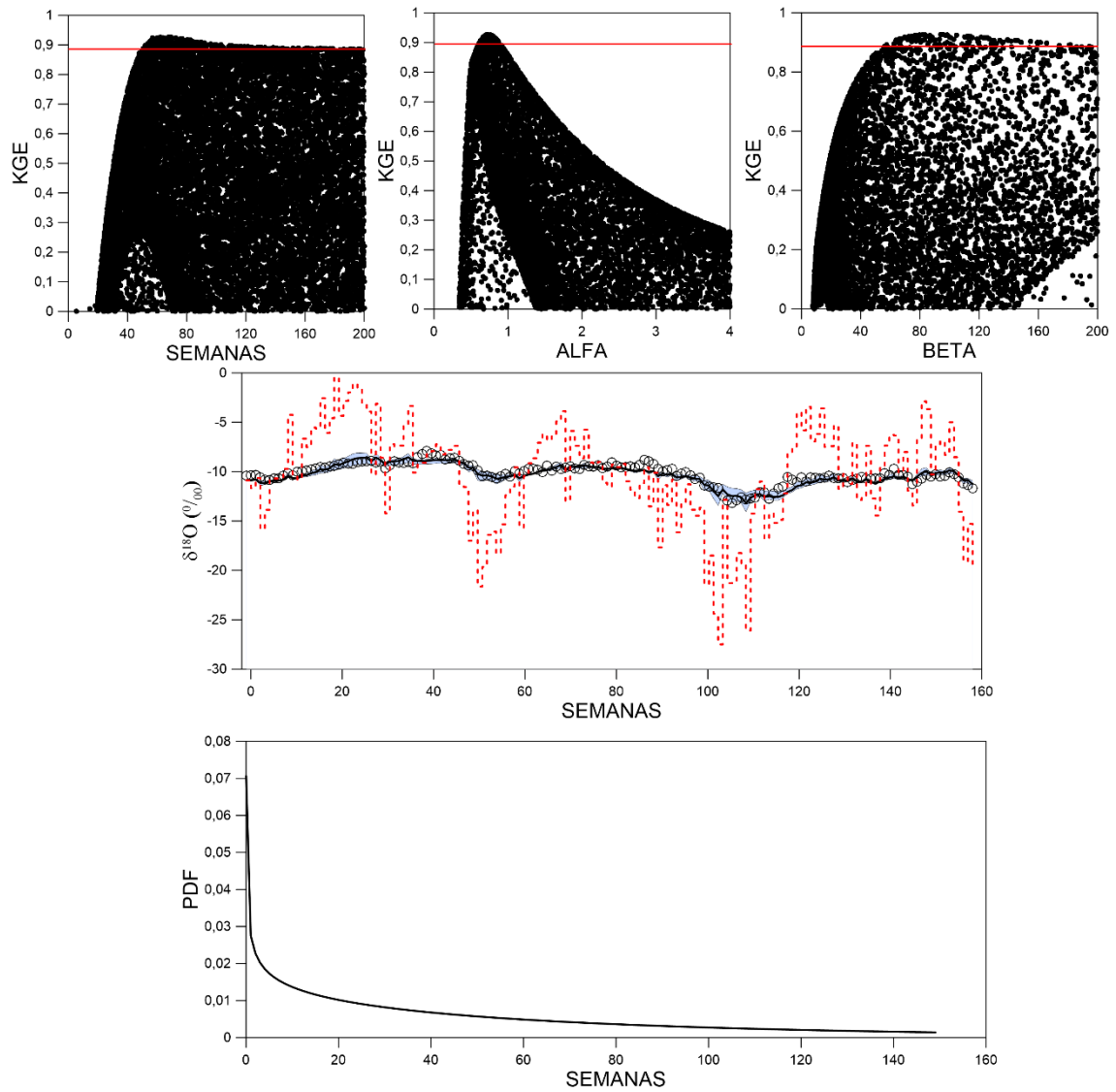
Dispersión



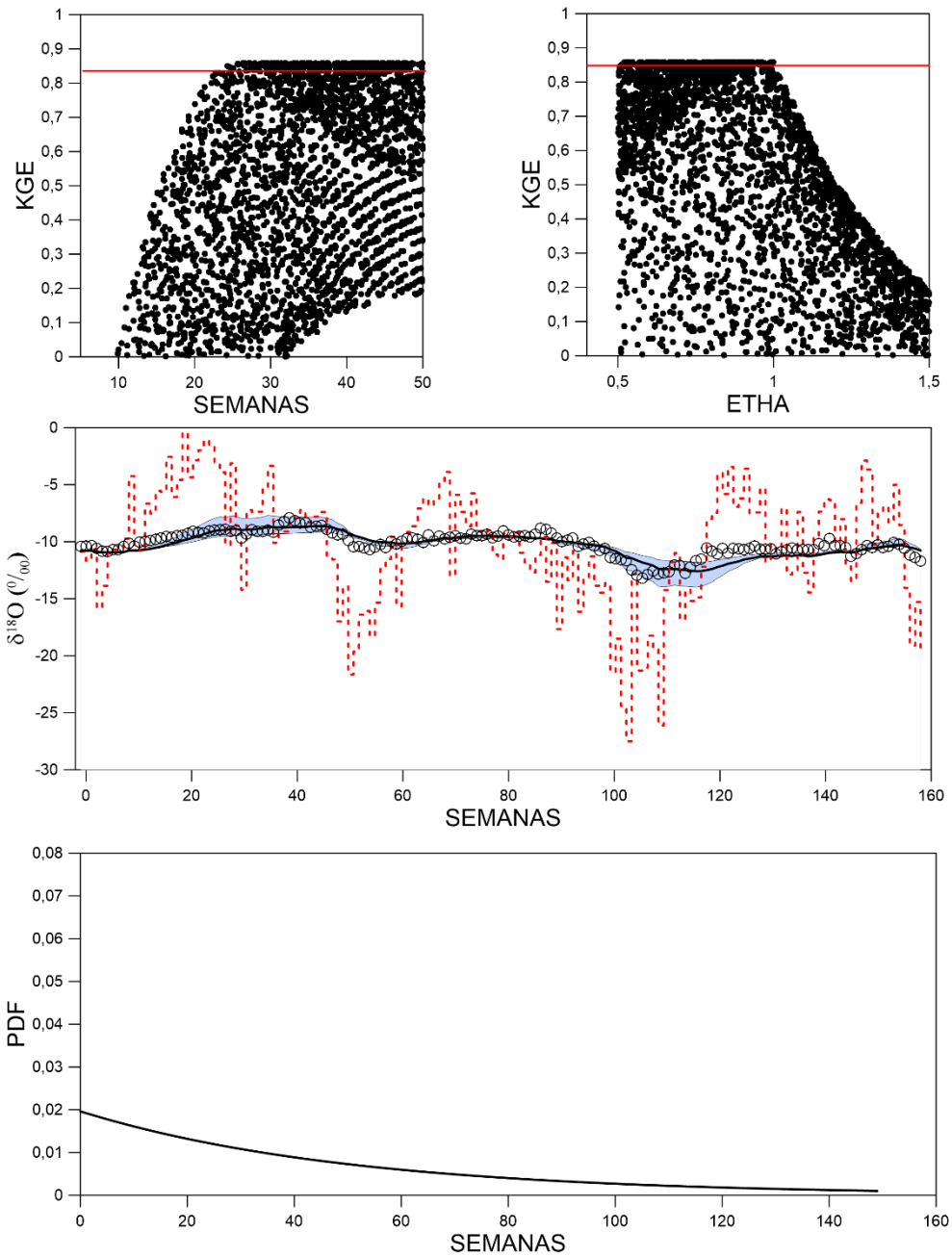
TPLR



GAMMA

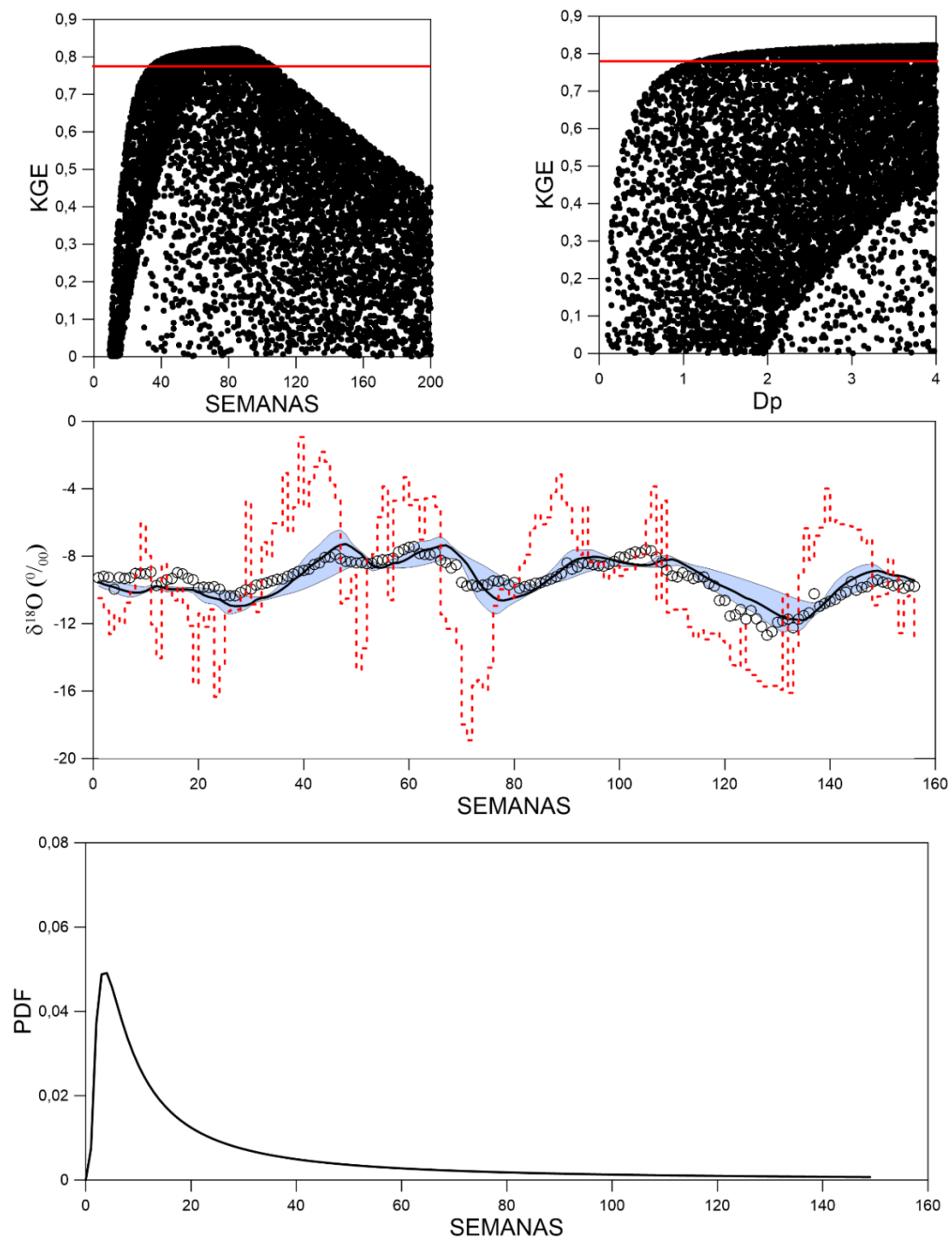


EXPONENCIAL PISTÓN

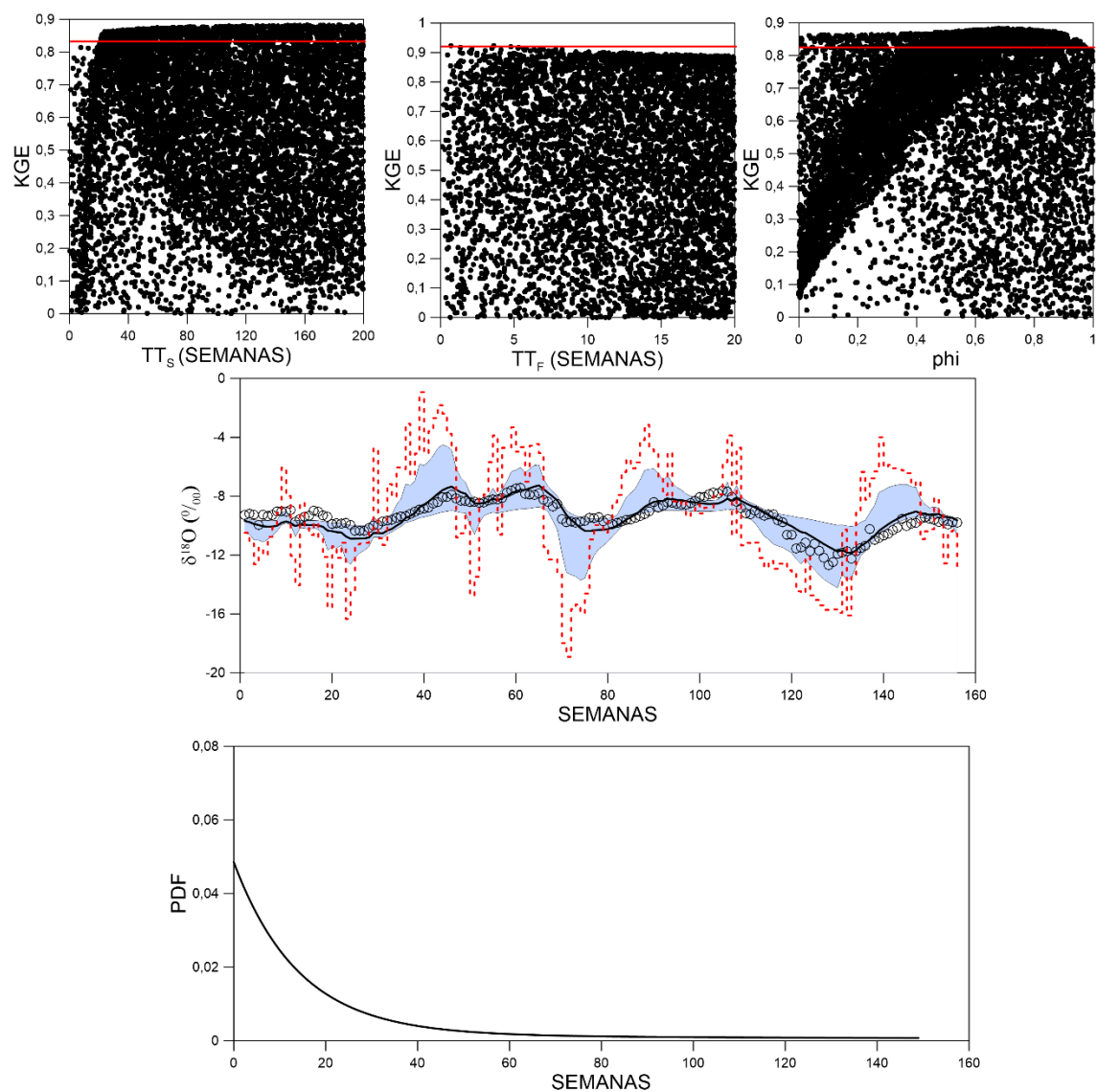


QQ12

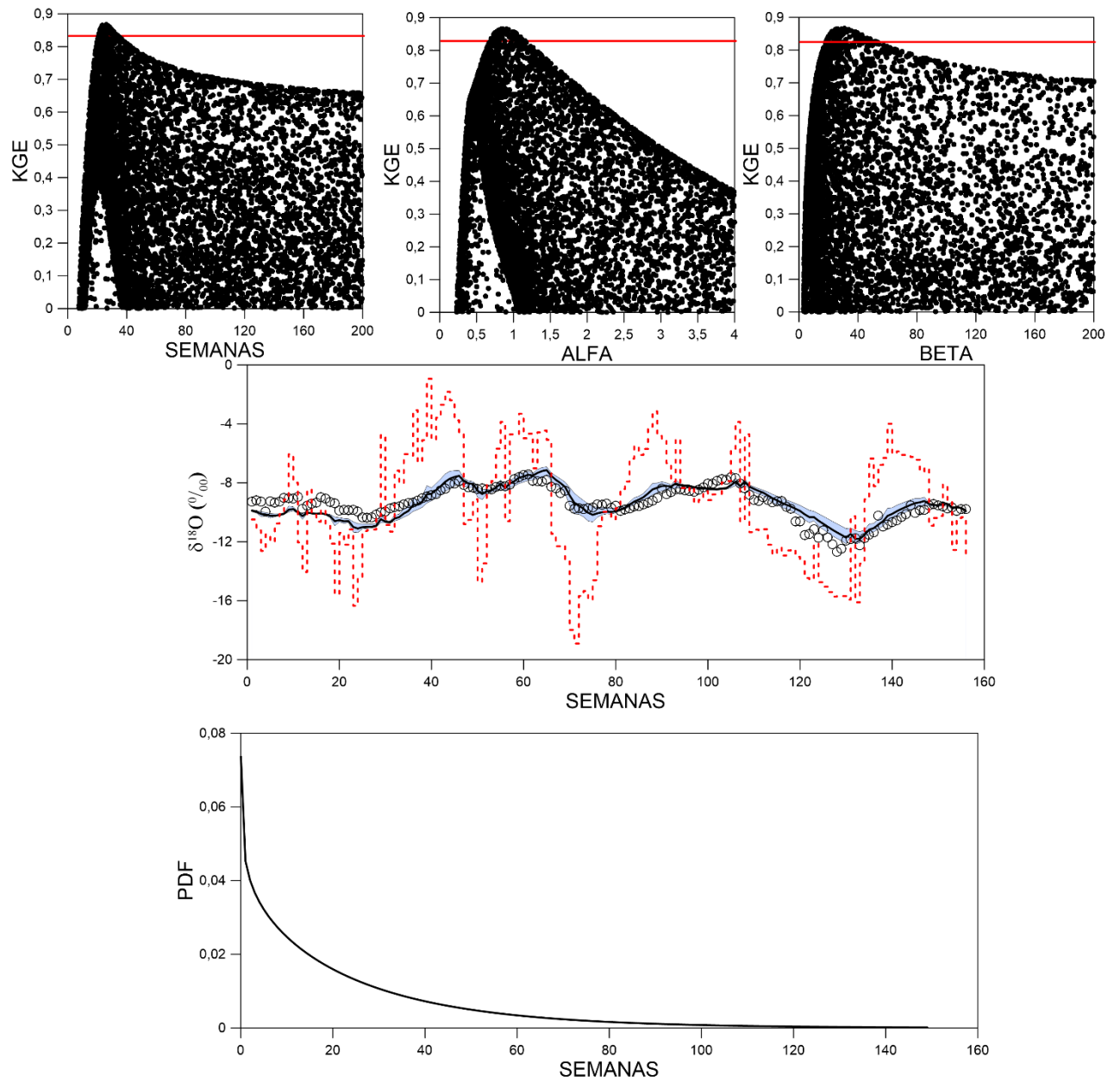
DISPERSIÓN



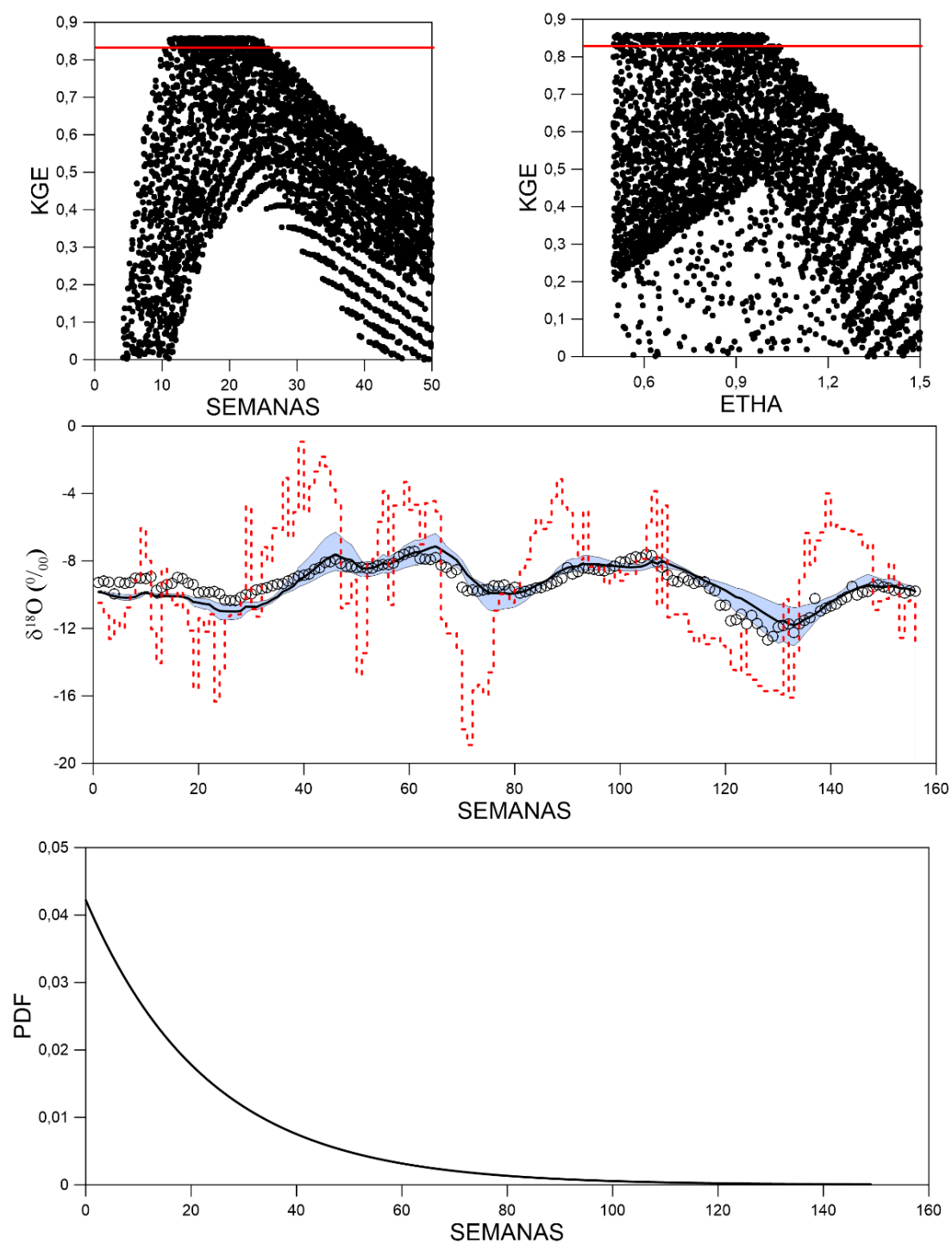
TPLR



GAMMA

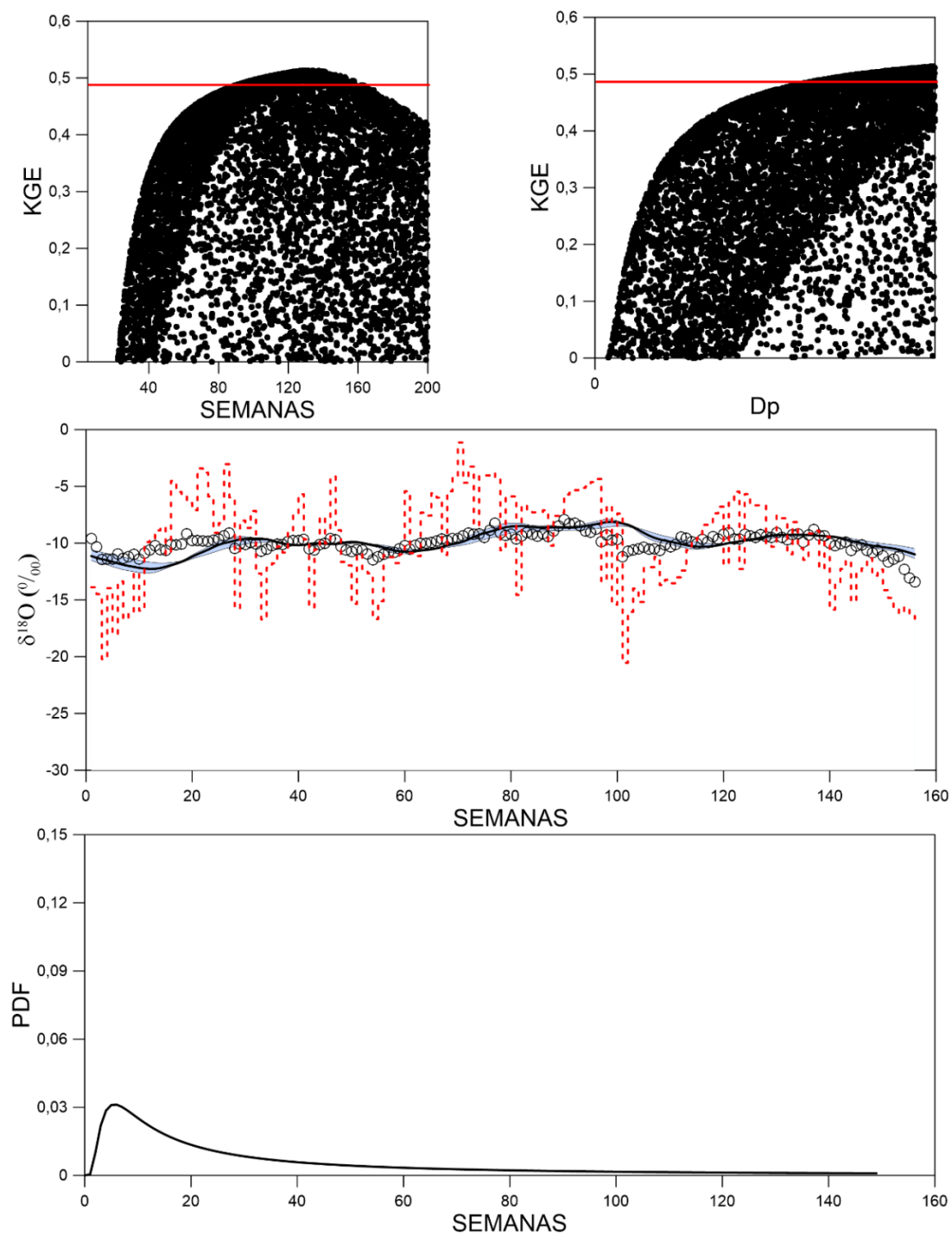


EXPONENCIAL PISTÓN

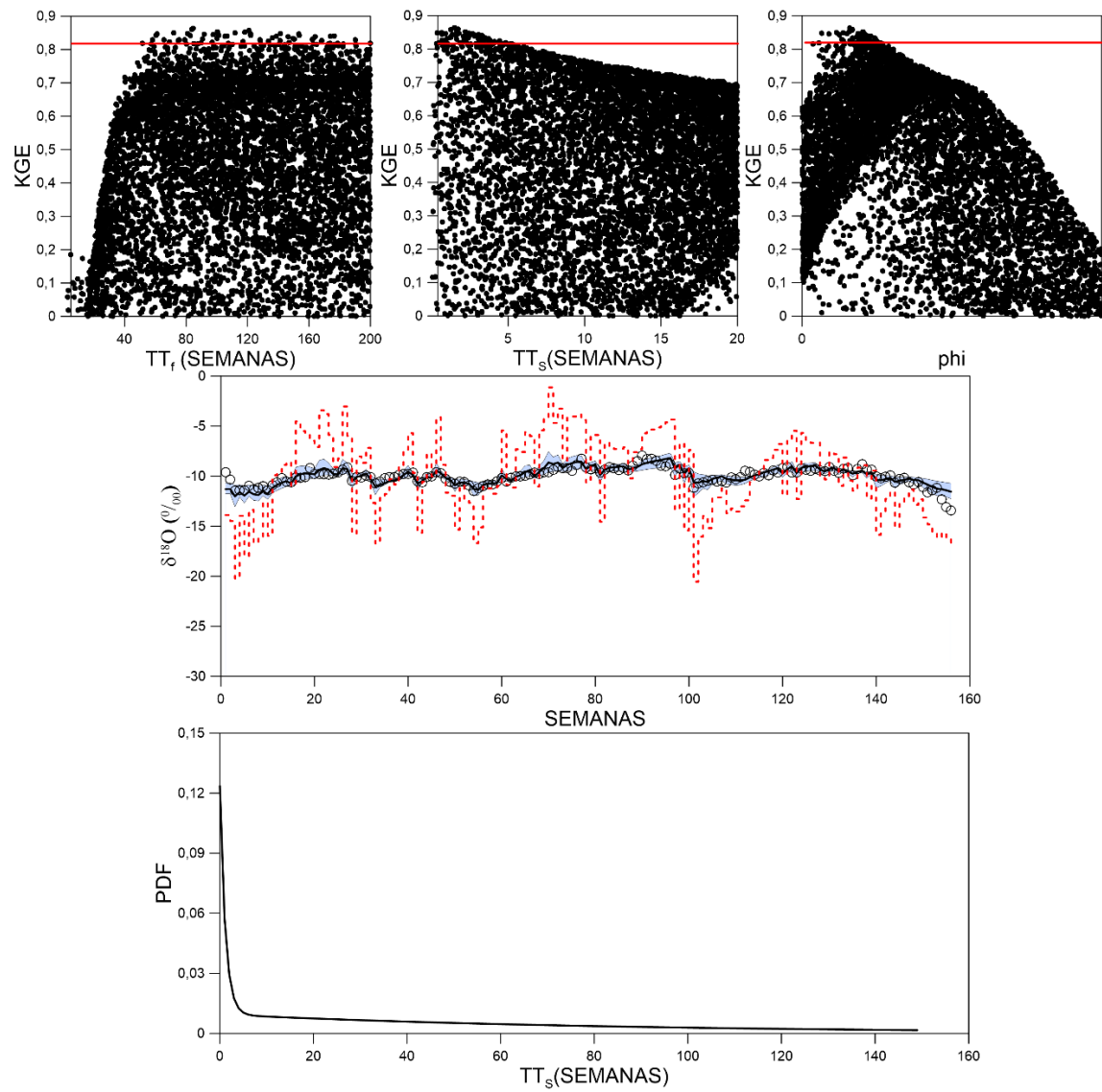


MATADERO

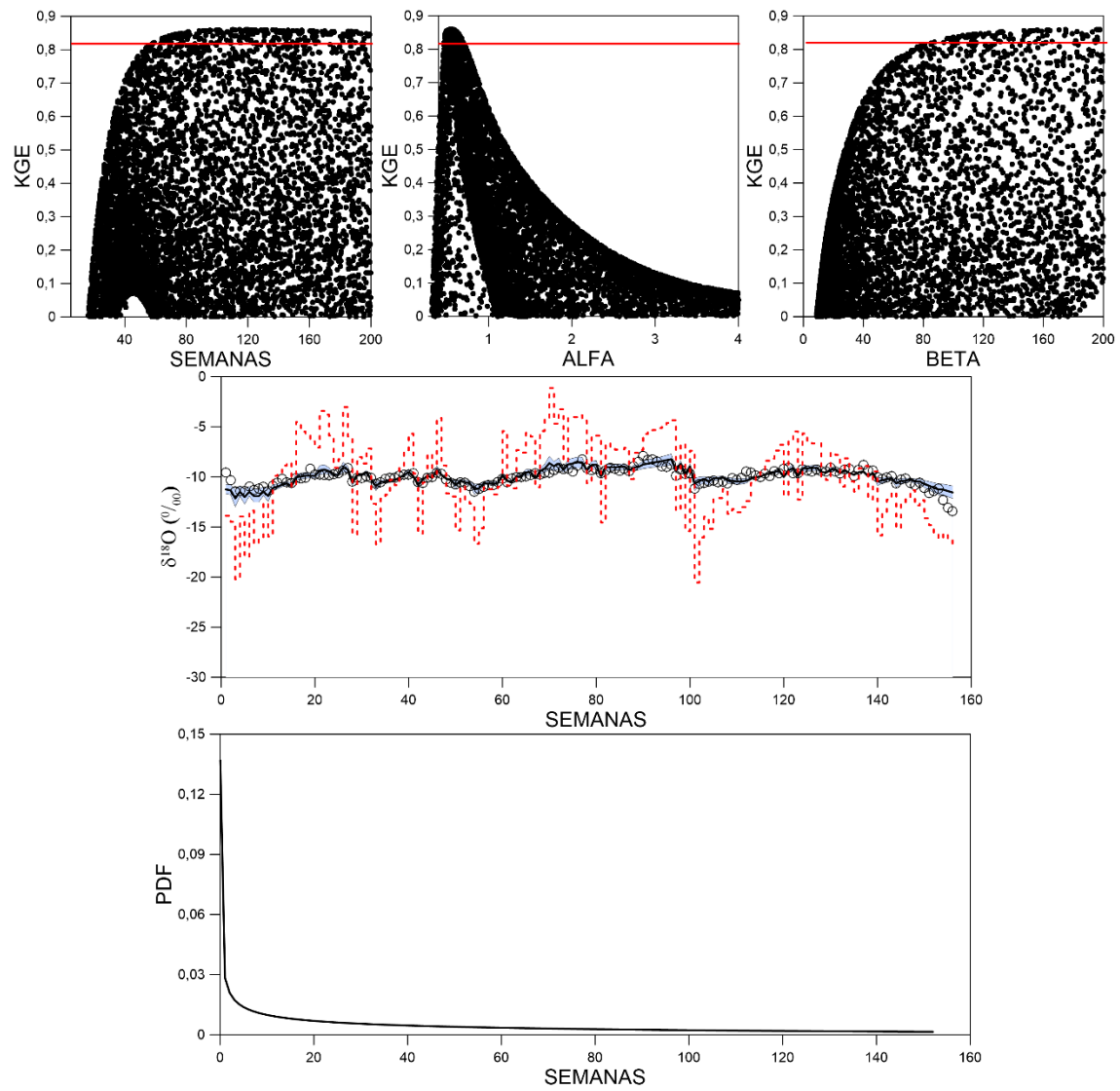
DISPERSION



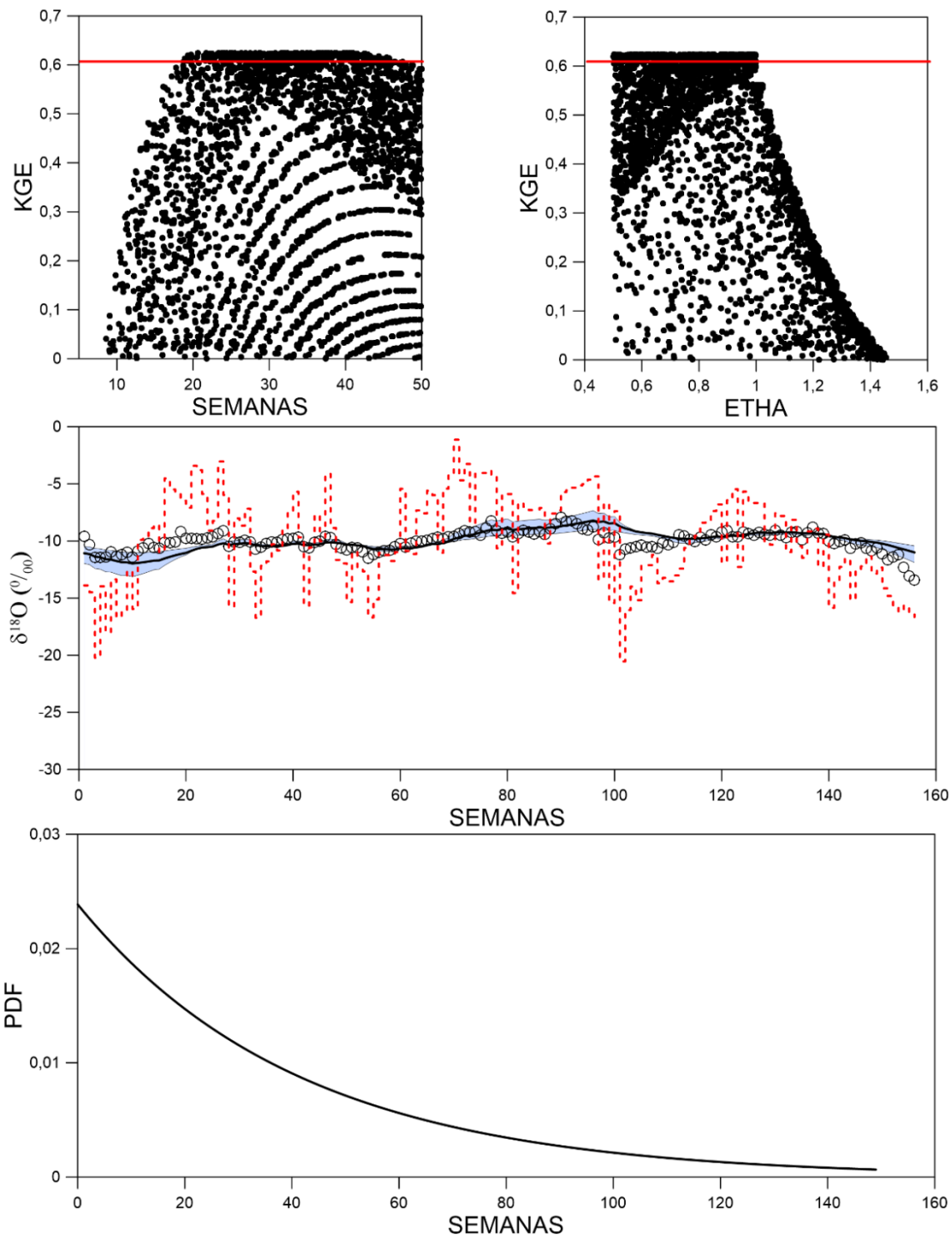
TPLR



GAMMA

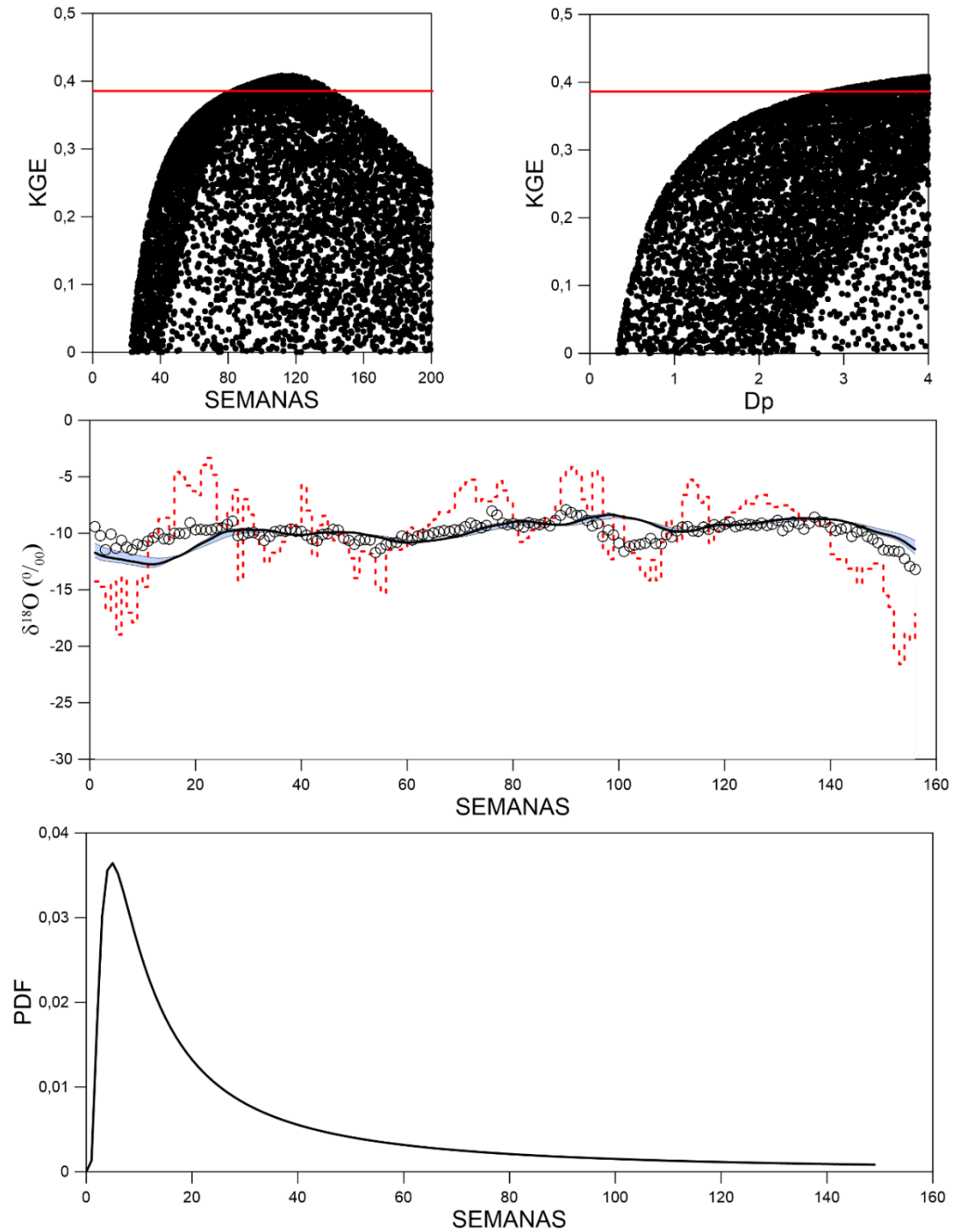


EXPONENCIAL-PISTÓN

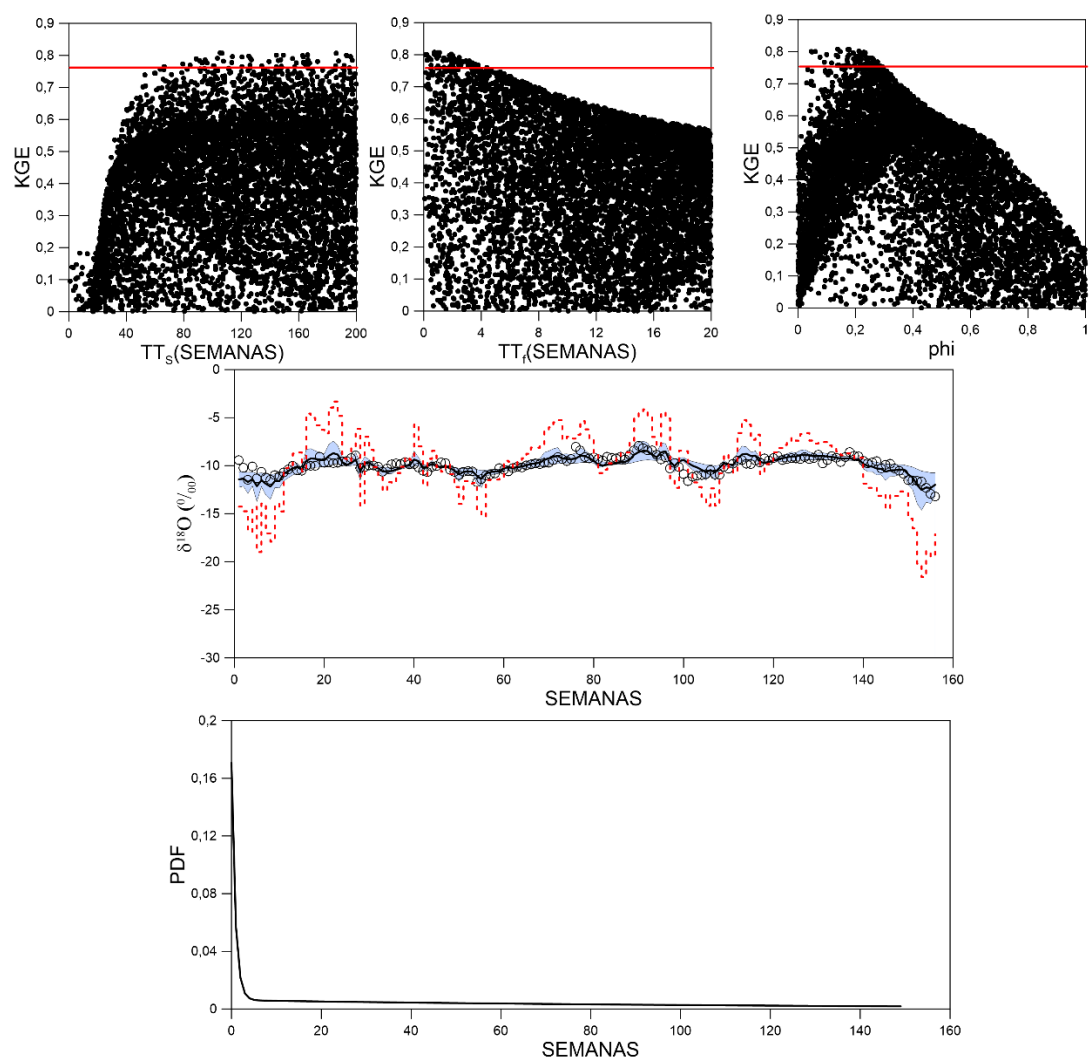


CHIRIMACHAY

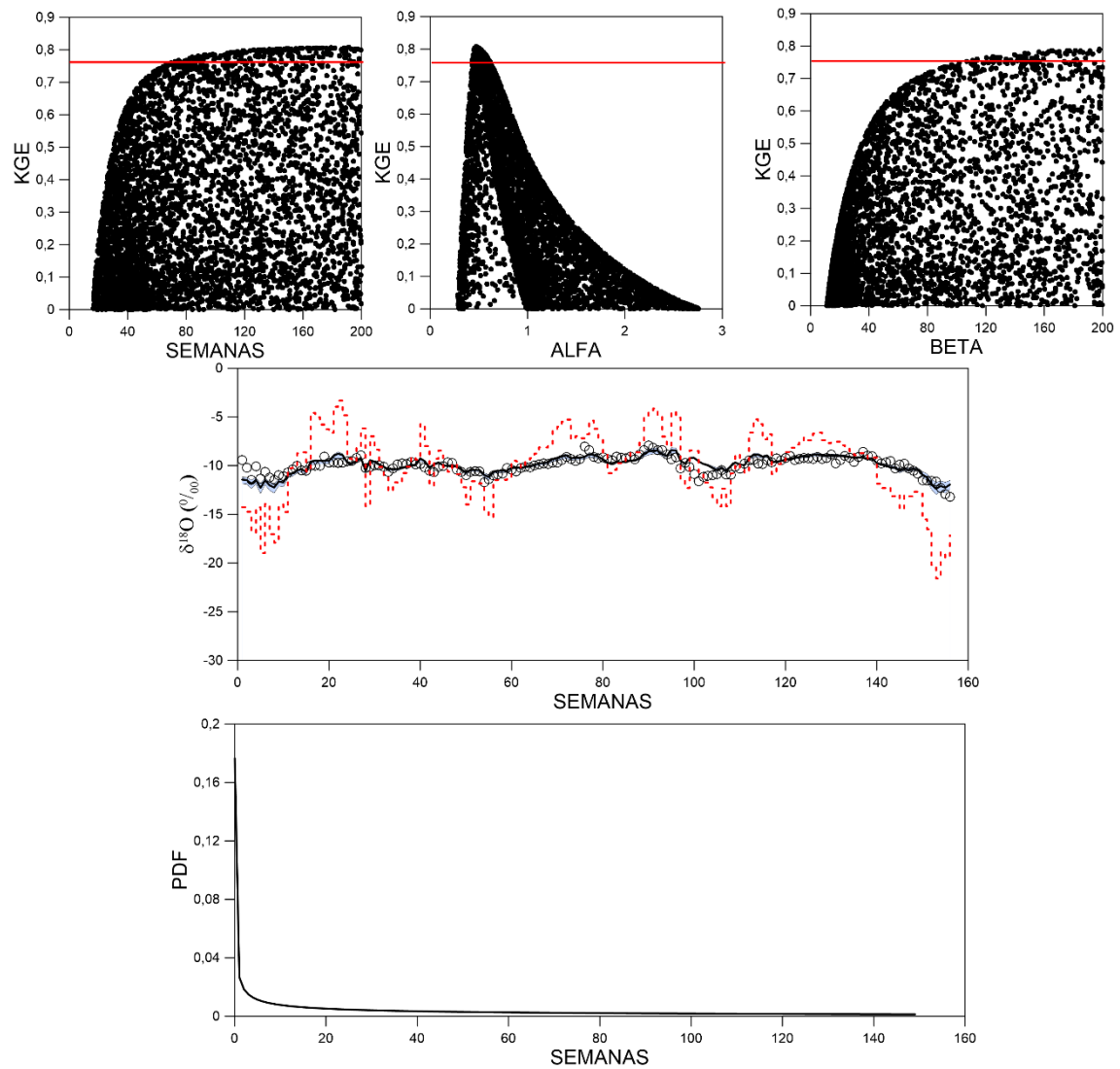
DISPERSIÓN



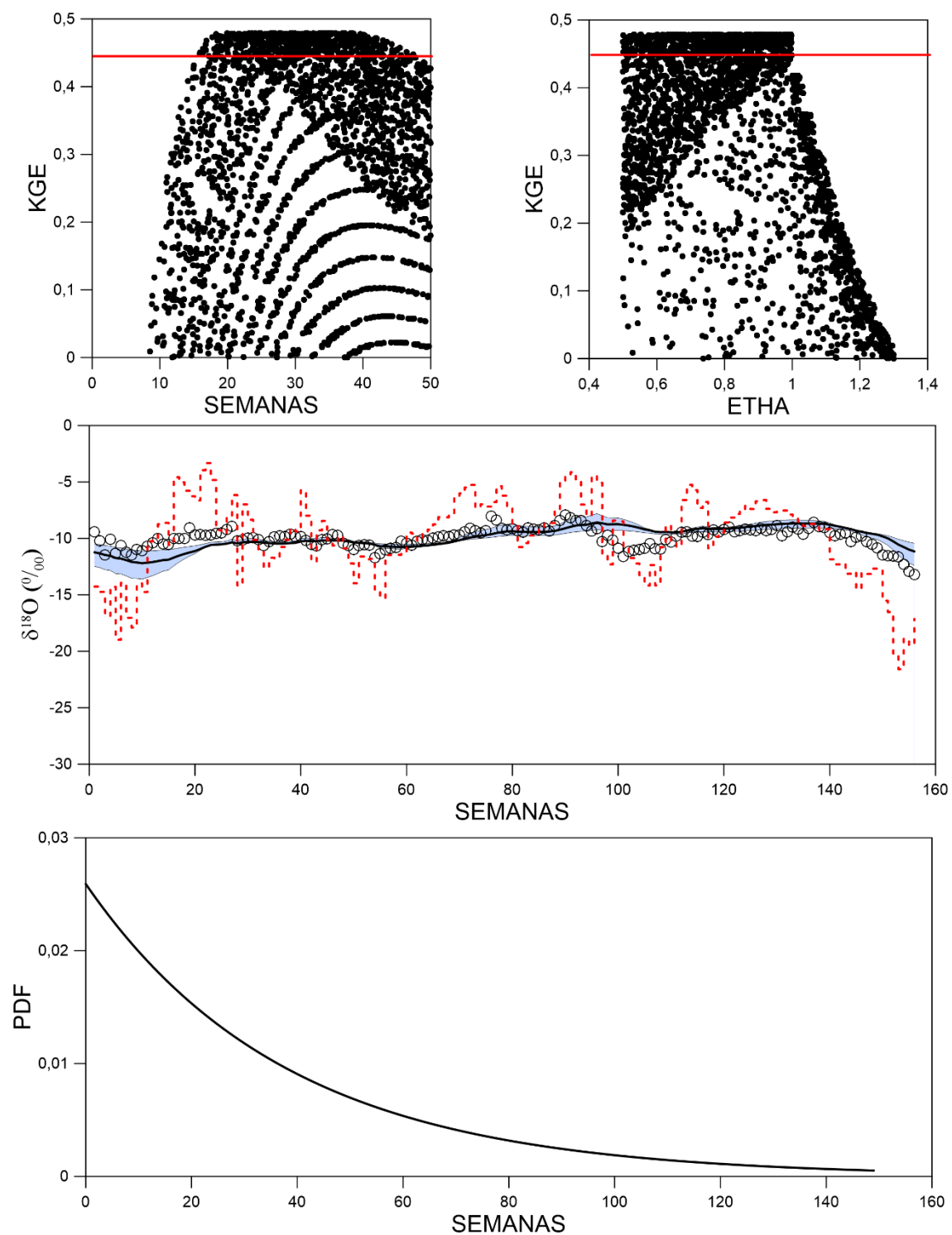
TPLR



GAMMA

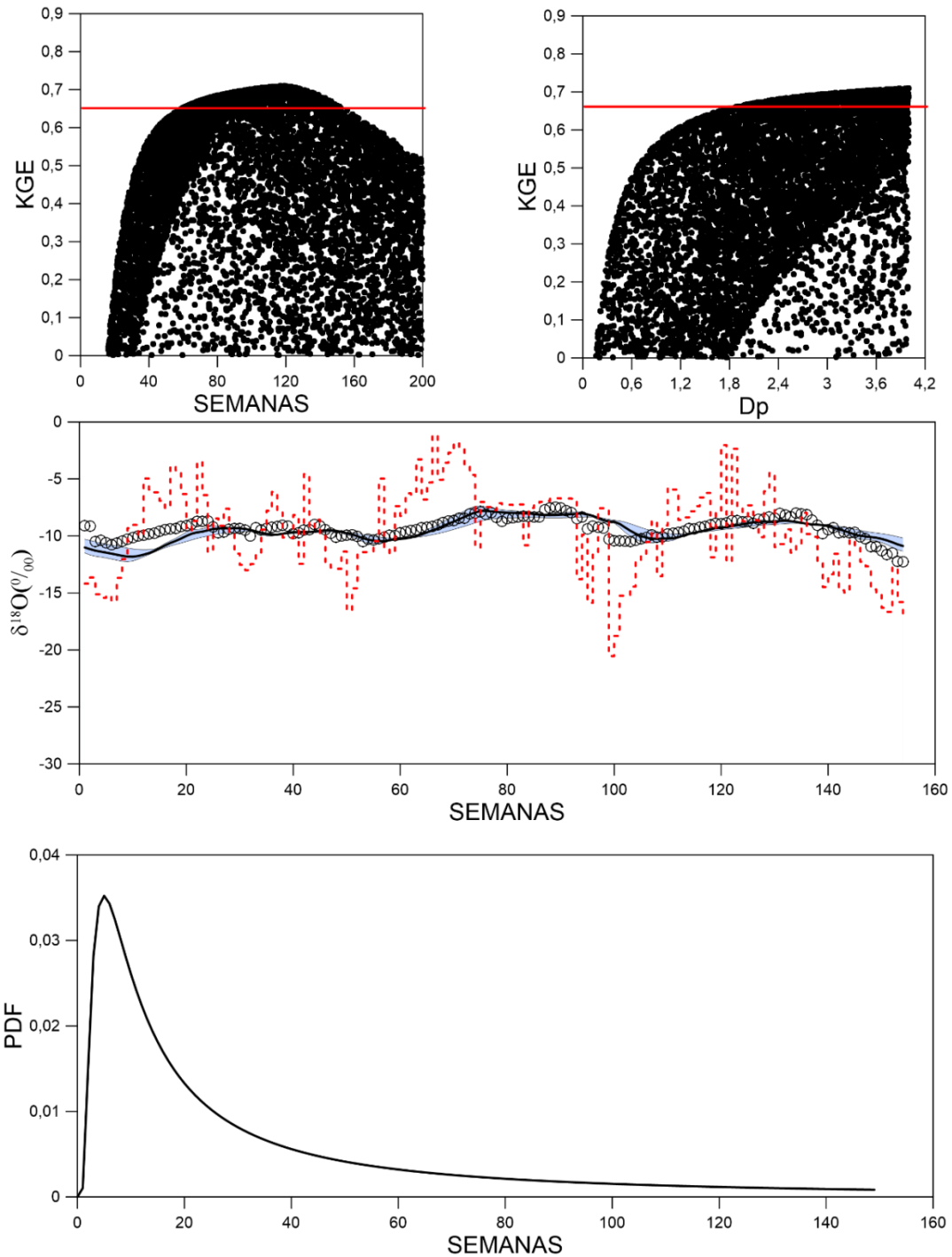


EXPONENCIAL-PISTÓN

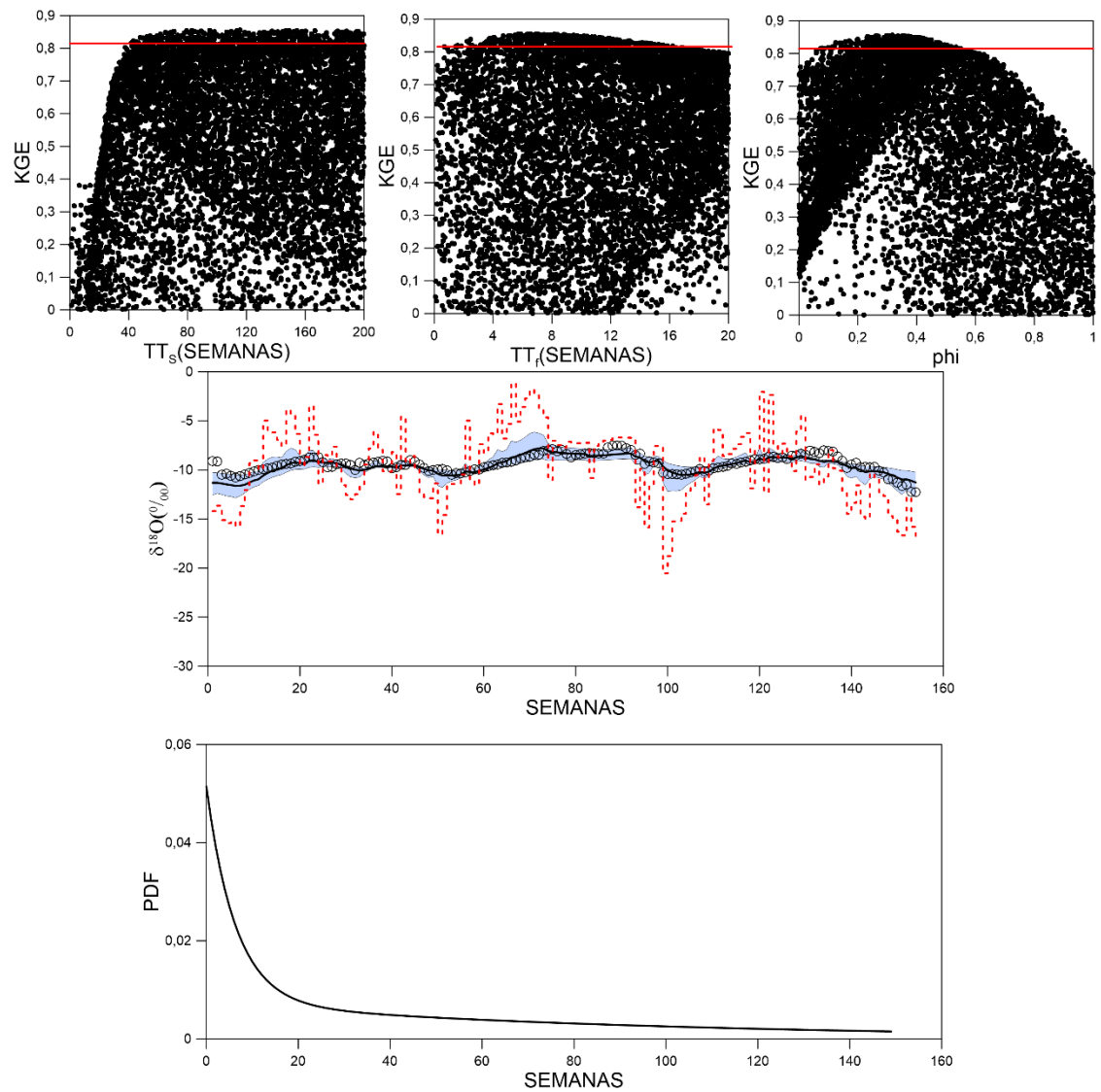


VIRGEN

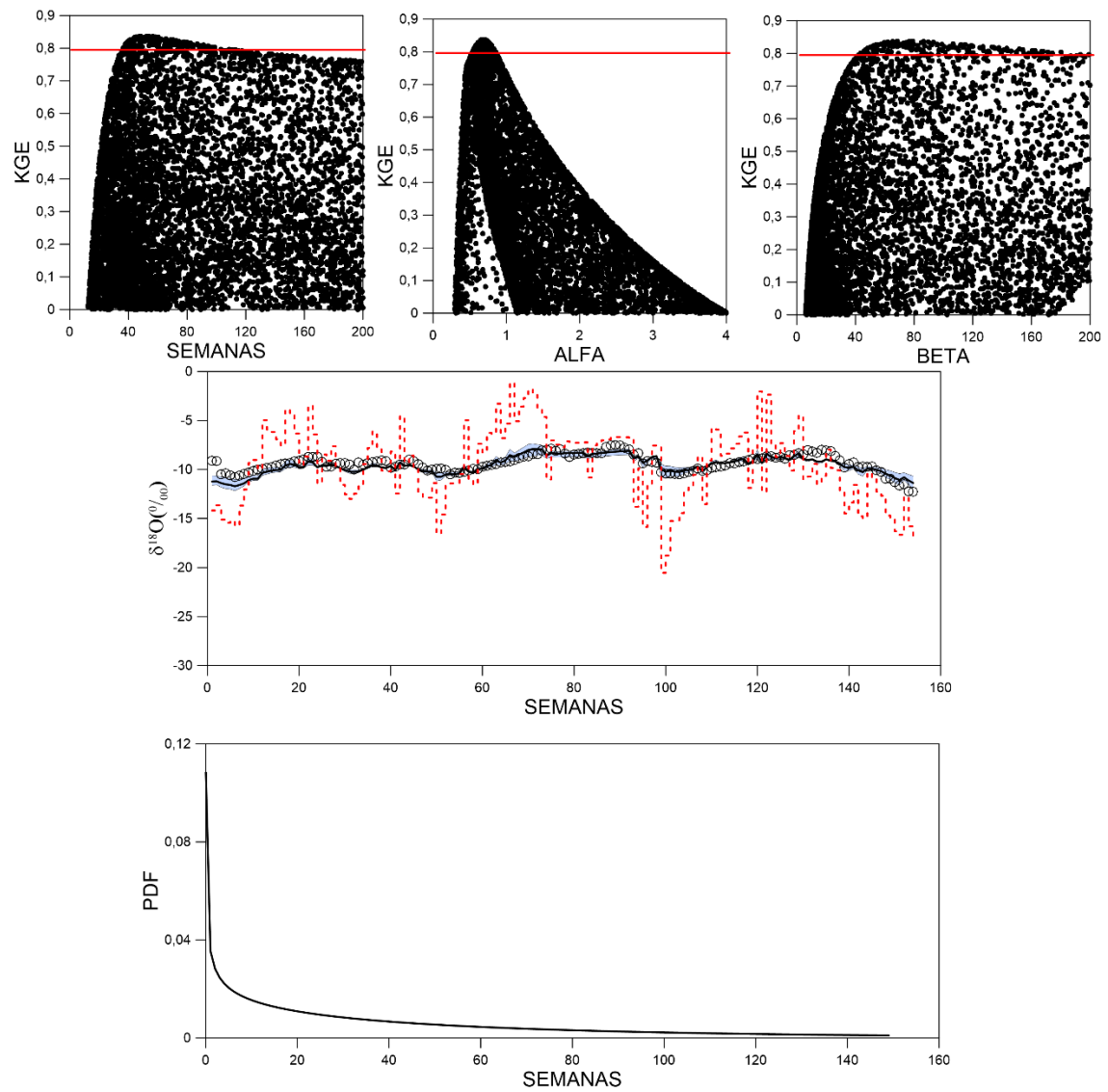
DISPERSION



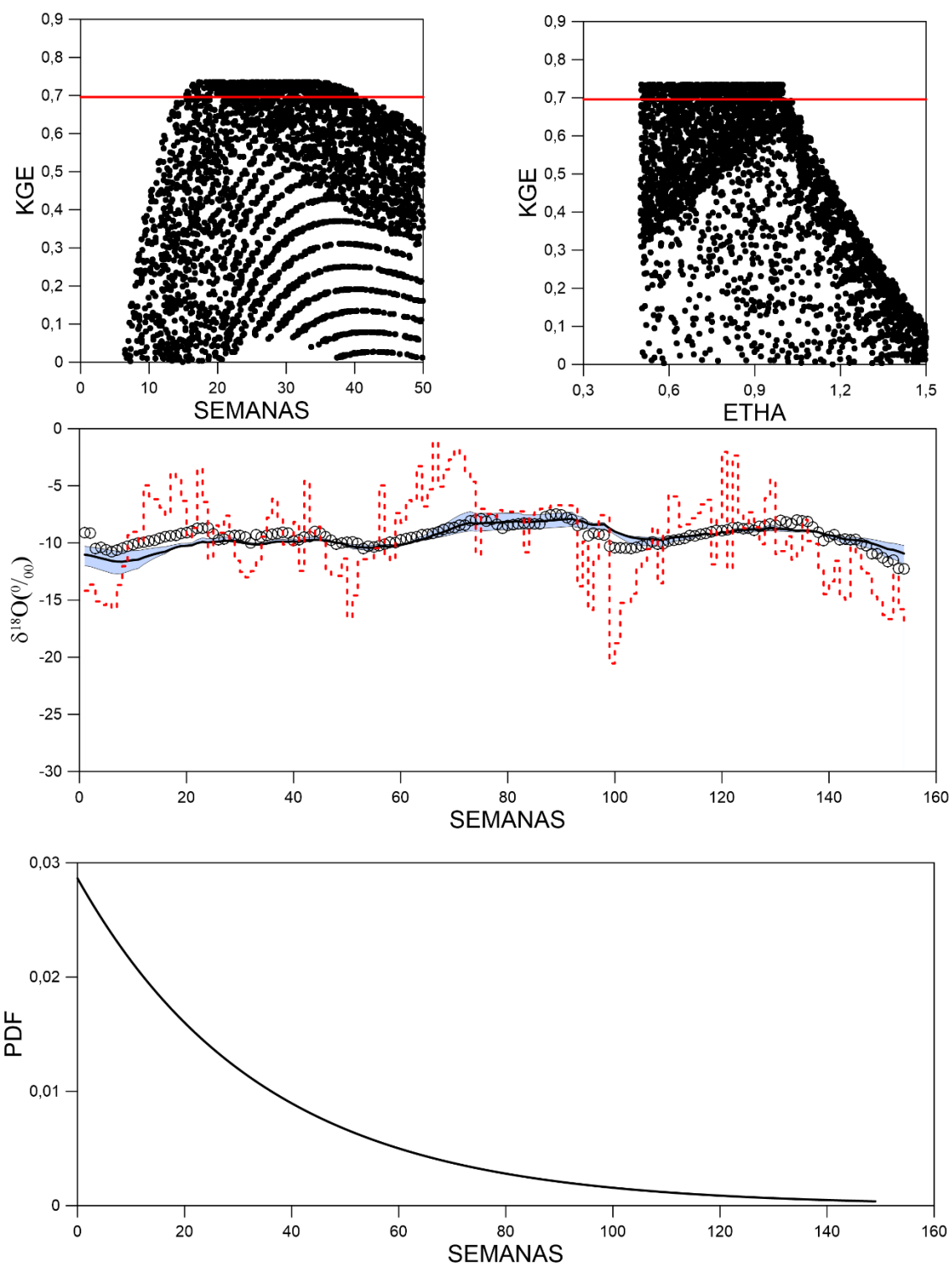
TPLR



GAMMA



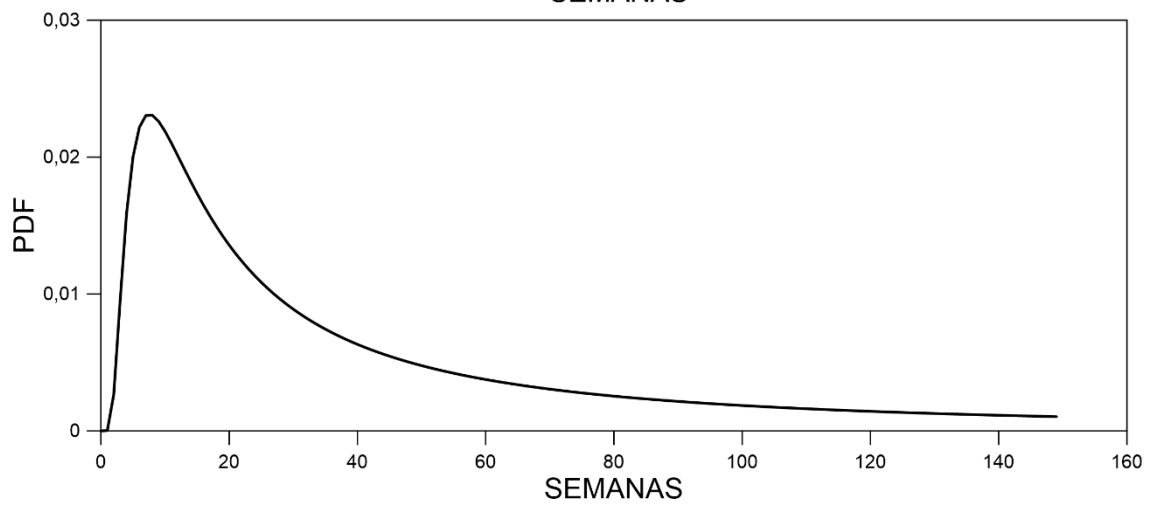
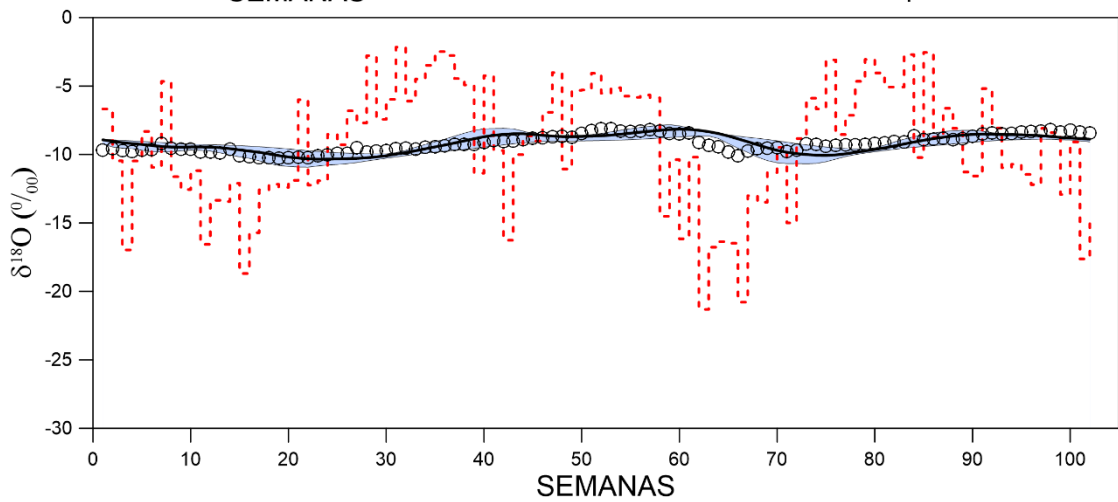
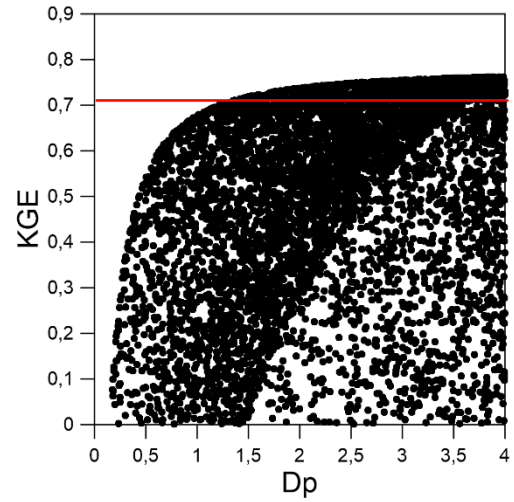
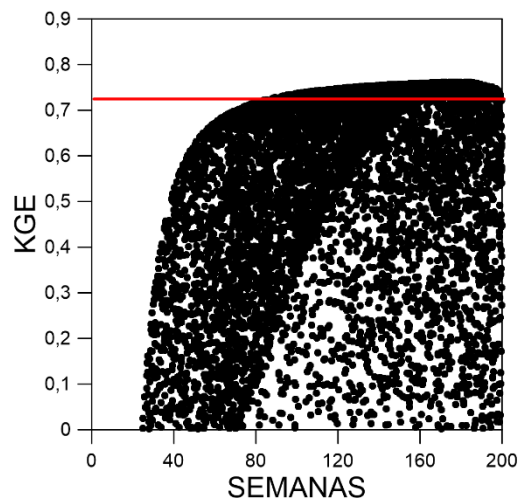
EXPONENCIAL-PISTÓN



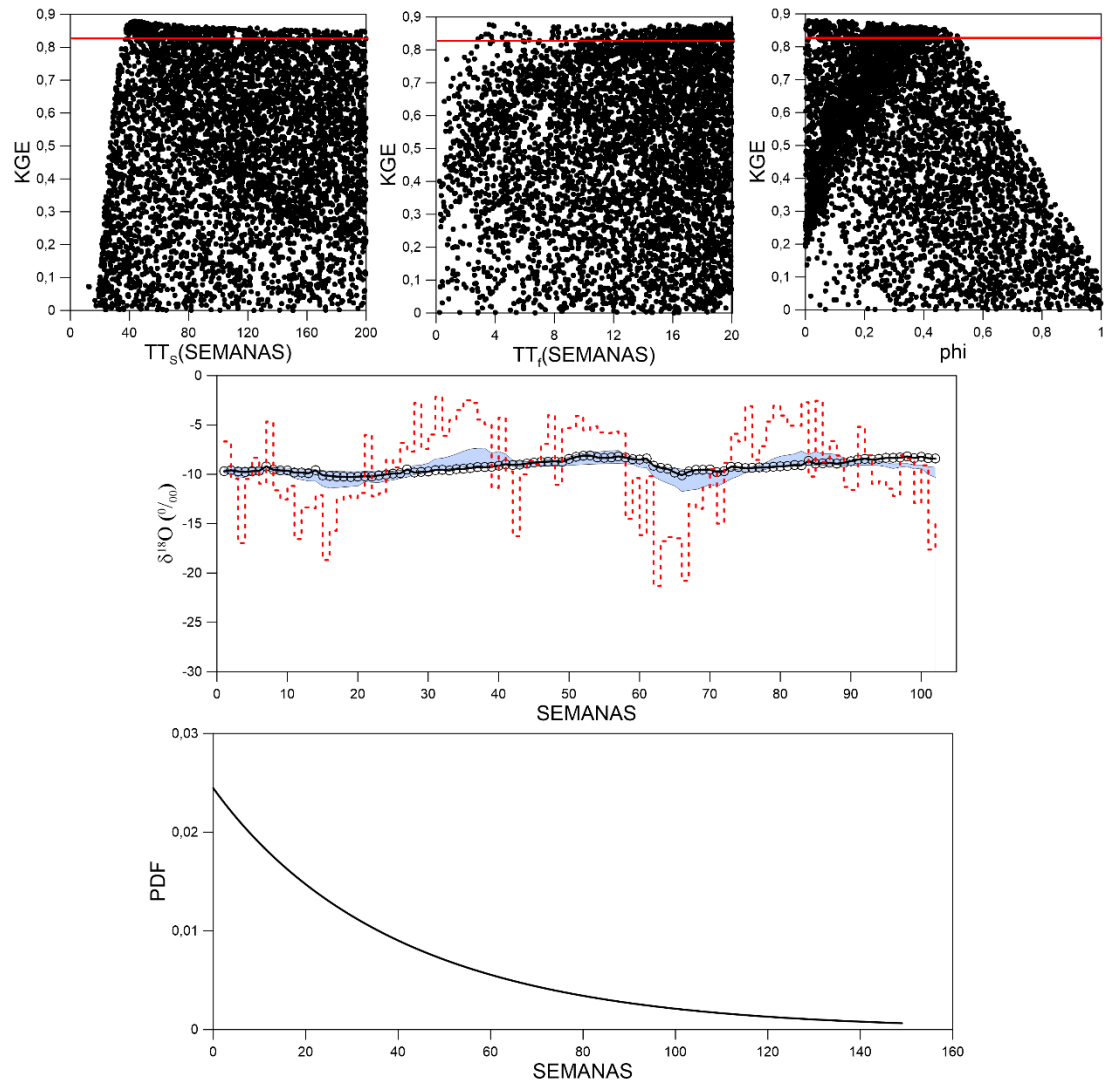
LAGUNAS

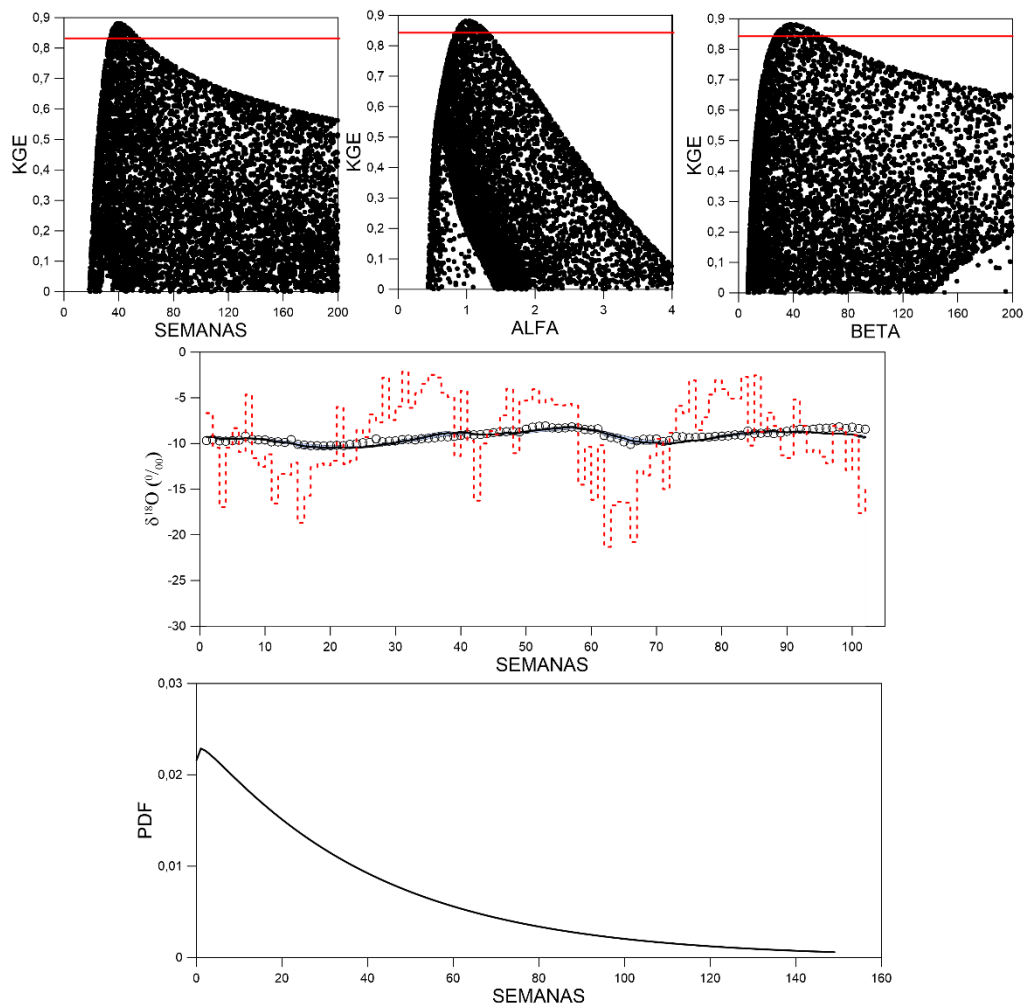
TOREADORA

DISPERSION

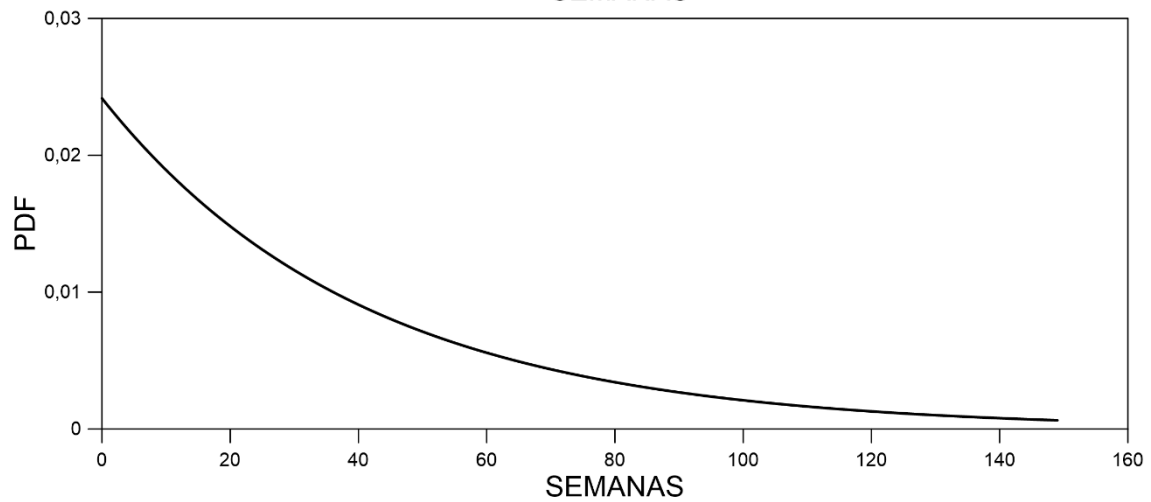
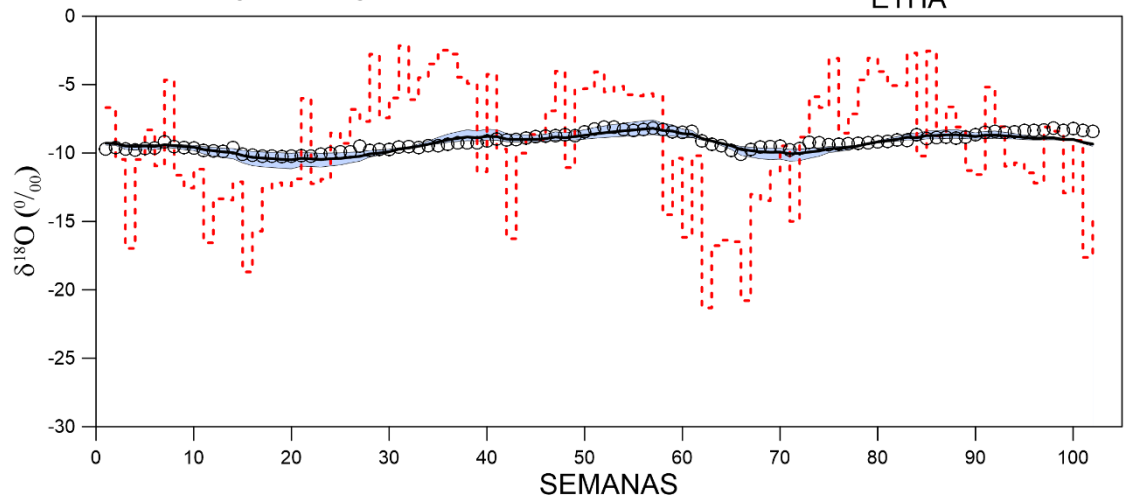
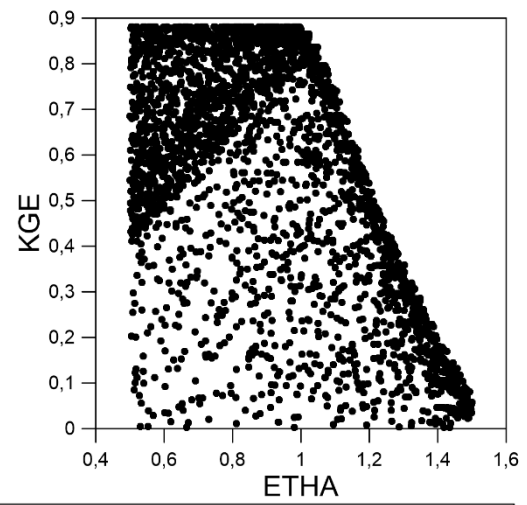
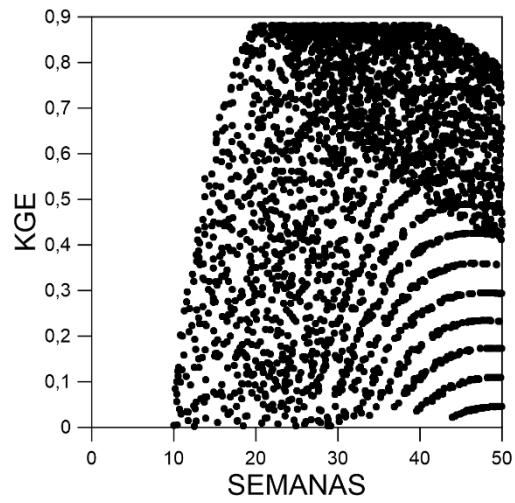


TPLR



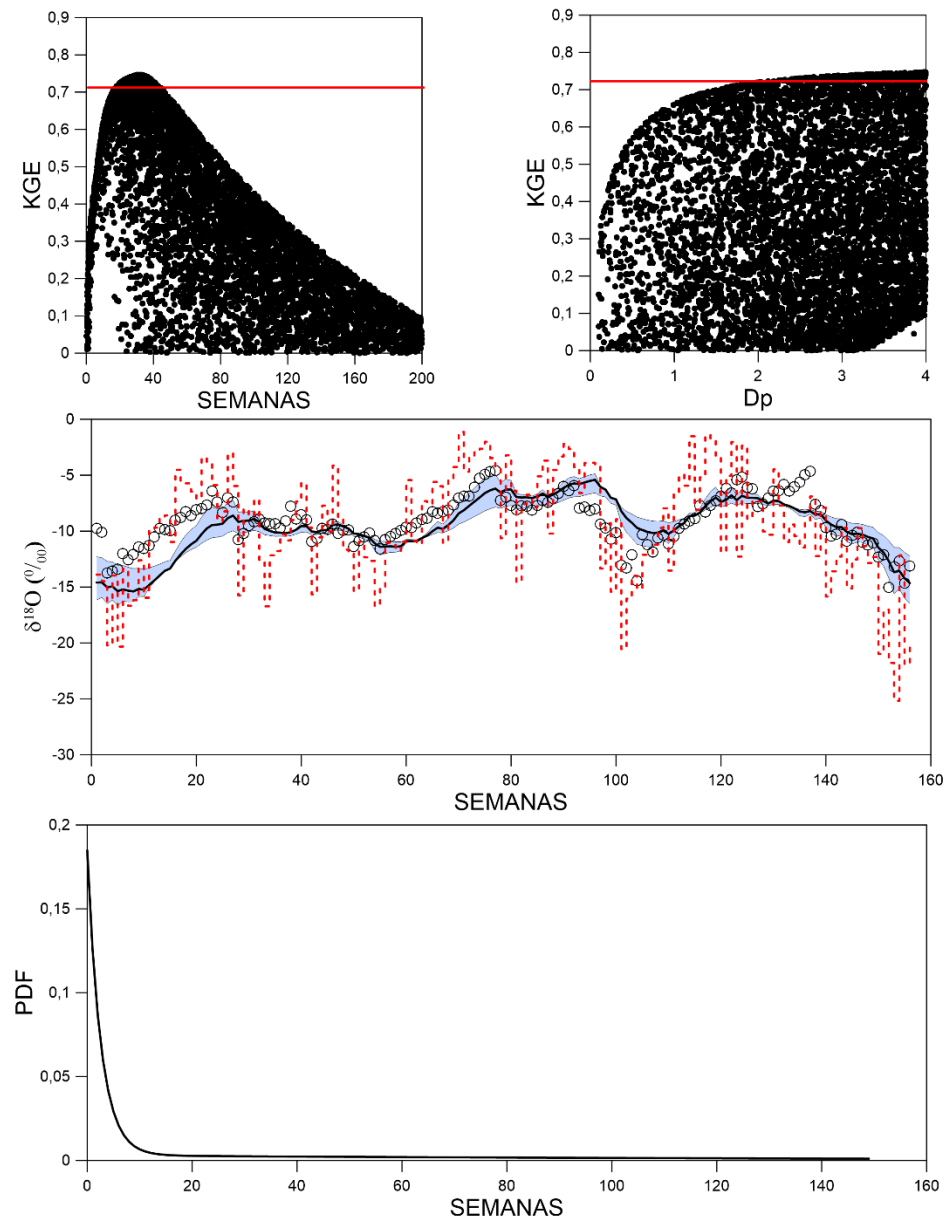
GAMMA

EXPONENCIAL-PISTÓN

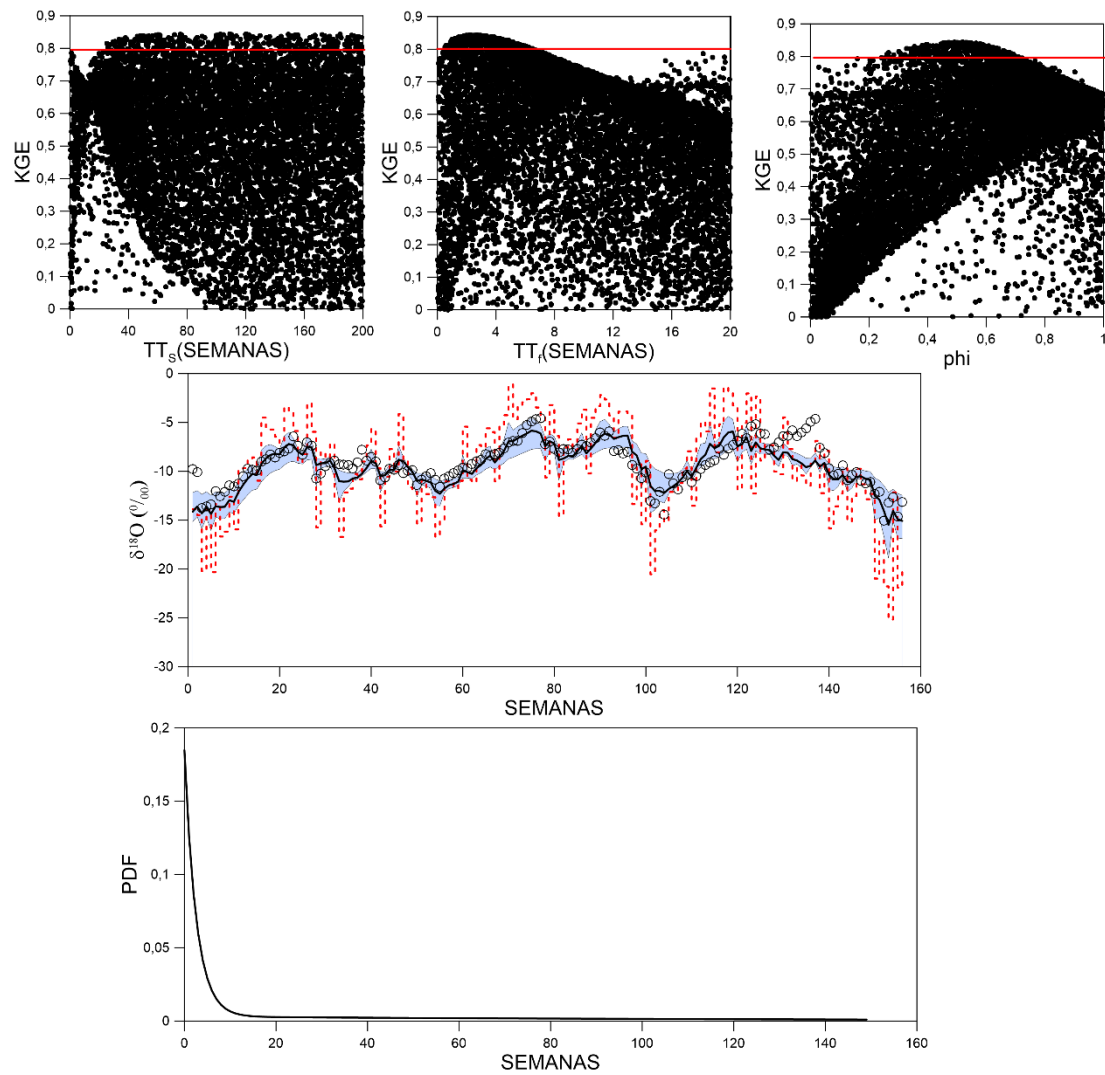


CABALLO SHAYANA

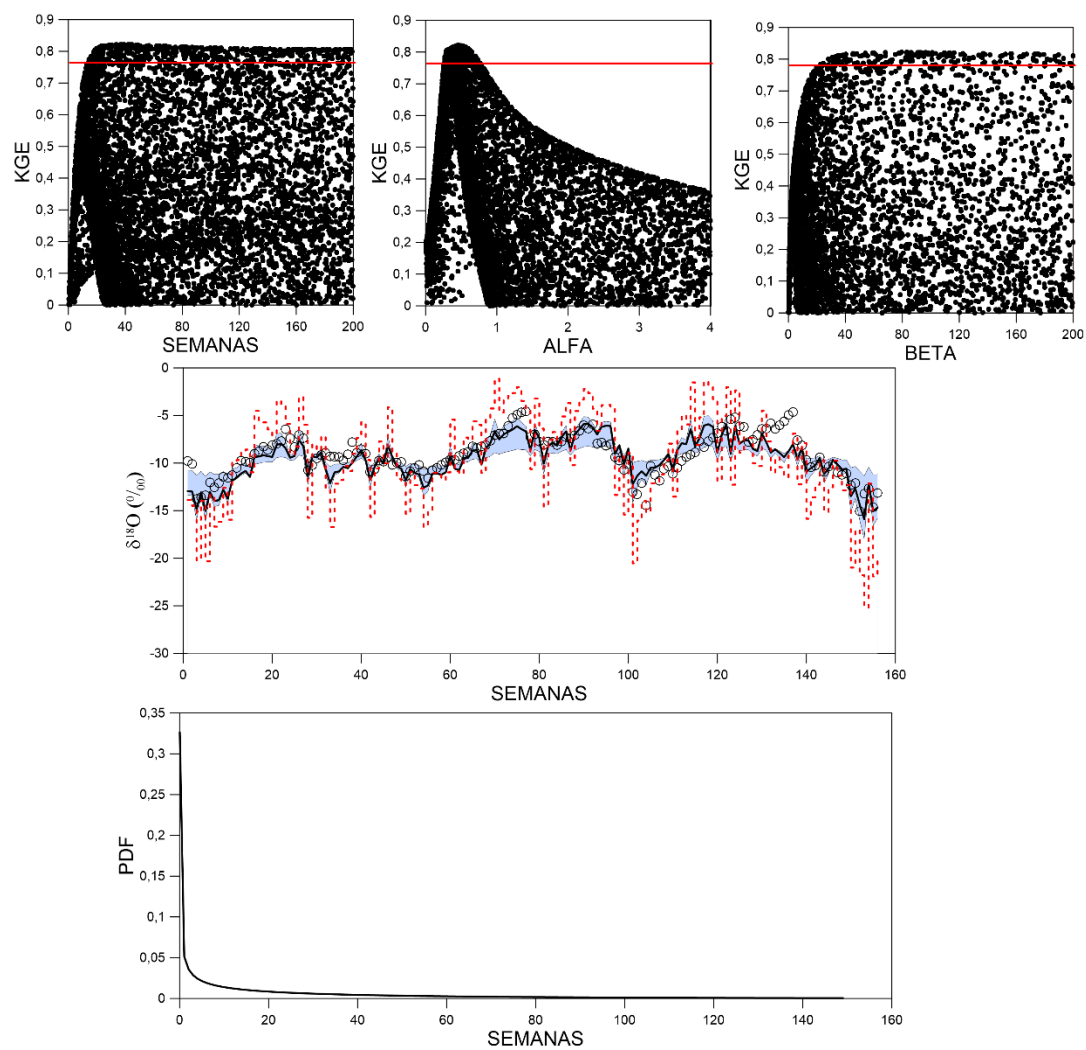
DISPERSIÓN



TPLR



GAMMA



EXPONENCIAL-PISTÓN

