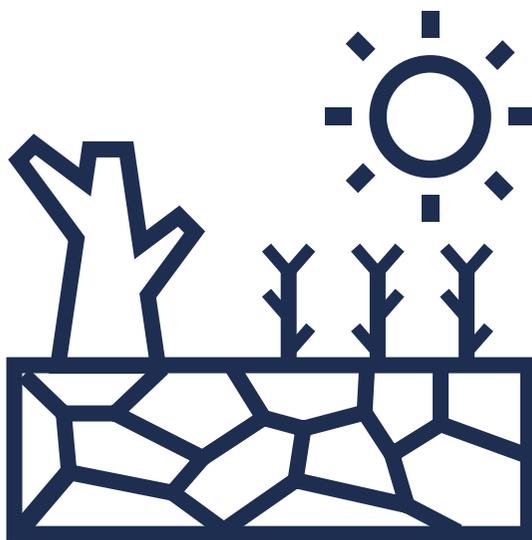


GUÍA METODOLÓGICA DETERMINACIÓN DE ÍNDICES DE SEQUÍA Y VEGETACIÓN Y ANÁLISIS DE LA PROPAGACIÓN ENTRE SEQUÍAS

Alex Manuel Avilés Añazco
Juan José Contreras Silva
Gabriela Alexandra Nieves Chungata
Jheimy Lorena Pacheco Niveló



GUÍA METODOLÓGICA

DETERMINACIÓN DE ÍNDICES DE SEQUÍA Y VEGETACIÓN Y ANÁLISIS DE LA PROPAGACIÓN ENTRE SEQUÍAS

Alex Manuel Avilés Añazco
Juan José Contreras Silva
Gabriela Alexandra Nieves Chungata
Jheimy Lorena Pacheco Niveló

Guía metodológica.

Determinación de índices de sequía y vegetación y análisis de la propagación entre sequías.

©Universidad de Cuenca
Facultad de Ciencias Químicas
Carrera de Ingeniería Ambiental

Alex Manuel Avilés Añazco
Juan José Contreras Silva
Gabriela Alexandra Nieves Chungata
Jheimy Lorena Pacheco Niveló

Autores

María Augusta Hermida Palacios
Rectora de la Universidad de Cuenca

Centro Editorial UCuenca Press

Director: Daniel López Zamora. **Coordinadora Editorial:** Ángeles Martínez Donoso.
Diseñador: Geovanny Gavilanes Pando. **Corrección de estilo:** Verónica Andrade Aguilar.

Ciudadela Universitaria
Doce de Abril y Agustín Cueva
(+ 593 7) 405 1000
Casilla postal 01.01.168
www.ucuenca.edu.ec

Primera edición. Formato digital

Derecho de autor reservados

ISBN Digital: 978-9978-14-556-2

Para la composición tipográfica de este manuscrito se usó *Alegreya sans*.

El presente documento ha sido evaluado por dos pares externos bajo el sistema doble ciego.

Agosto, 2024

Cuenca - Ecuador

Esta guía fue un producto del proyecto “Adaptación a los impactos del cambio climático en los recursos hídricos en los Andes (AICCA), caso de estudio en la subcuenca del río Machángara” en el marco del convenio interinstitucional entre la Universidad de Cuenca, el Consorcio para el Desarrollo Sostenible De la Ecorregion Andina y la Empresa Electro Generadora del Austro Elecaastro S.A., bajo la supervisión del Ministerio de Ambiente, Agua y Transición Ecológica (MAATE).

Índice

1. Presentación	9
2. Introducción	10
3. Marco teórico	11
3.1. Conceptos fundamentales sobre índices de sequía	11
3.2. Descripción de los índices climáticos y variables de reanálisis...12	
Índices climáticos	12
Variables de reanálisis	13
3.3. Conceptos fundamentales wavelets.....	14
Transformada Wavelet.....	14
Escala.....	15
Desplazamiento o posición.....	16
Transformada Wavelet Continua (CWT)	16
Proceso de construcción de escalas de wavelets.....	17
Elección de la wavelet madre.....	18
Cono de Influencia.....	18
Nivel de significación	19
Transformada Wavelet Cruzada	19
Coherencia Wavelet	19
4. Metodología	21
4.1. Índice de precipitación estandarizado (SPI)	21
4.2. Índice de caudal estandarizado (SSI)	21
4.3. Índice de condición de la vegetación (VCI).....	22
5. Caso de estudio	24
5.1. Recopilación de la información.....	24
5.2. Cálculo de SPI	26
5.3. Cálculo de SSI.....	28
5.4. Cálculo de VCI	32
5.5. Cálculo de la relación entre los índices de sequía - vegetación ...	39
5.6. Identificación de las épocas húmedas y secas	44

5.7. Evaluación de la relación entre las variables temperatura y precipitación con el índice de condición de la vegetación (VCI)	50
5.8. Evaluación de la relación entre el índice de condición de la vegetación (VCI) con los índices climáticos a escala sinóptica	56
5.9. Evaluación de la relación entre el índice de condición de la vegetación (VCI) con las variables atmosféricas a escala local	63
6. Bibliografía	65

Índice de figuras

Figura 1. Comparación de las ventanas de tiempo en el análisis TCF y Wavelet.	15
Figura 2. Esquema de la transformación wavelet continua.	17
Figura 3. Diferencia de fase y su interpretación.	20
Figura 4. Ubicación de las estaciones de precipitación y de caudal, así como de las cuencas de aporte a los embalses de El Labrado y Chanlud.	24
Figura 5. Selección del formato de los datos de entrada: CSV (delimitado por comas).	26
Figura 6. Ejemplificación del proceso de cálculo del SPI 1 El Labrado.	27
Figura 7. Gráfico de los resultados de la serie SPI 1 El Labrado, en Excel.	28
Figura 8. Estructura de los datos de entrada (agrupación trimestral de caudal)	28
Figura 9. A) Filtración de datos por meses, B) selección de la distribución de probabilidad que mejor se ajusta a las series mensuales, C) normalización de la serie.	30
Figura 10. Representación de los resultados obtenidos del índice SSI en Excel.	31
Figura 11. Ingreso a la página para la descarga de datos MODIS.	32
Figura 12. Elección de la opción "Area Sample".	33
Figura 13. Ejemplo de cómo cargar el área de estudio en la página.	33
Figura 14. Elección del período de las imágenes y el producto satelital.	34
Figura 15. Elección del formato de descarga de los datos satelitales.	34
Figura 16. Descarga de datos.	35
Figura 17. Instalación y carga de paquetes en el software R.	35
Figura 18. Configuración del número de núcleos a utilizar y la ubicación de los archivos.	36
Figura 19. Directorio de trabajo y carga de imágenes satelitales descargadas.	36
Figura 20. Ejecución del código.	37
Figura 21. Visualización de los datos.	37
Figura 22. Visualización de los datos de acuerdo al período de interés.	38
Figura 23. Gráfico de serie temporal en Excel del índice VCI.	39
Figura 24. Base de datos del SPI-SSI Chanlud.	40
Figura 25. Script de Coherencia Wavelet. Pasos del 2 al 5.	41
Figura 26. Resultados de Coherencia entre SPI y SSI Chanlud.	41
Figura 27. Coherencia wavelet promedio por periodo entre SPI, SSI Chanlud.	42

Figura 28. Identificación del ángulo de fase (A) y tiempo de desfase (B) del periodo correspondiente a 11 meses (0.9 años)	43
Figura 29. Paso 1: Inicio, Formato condicional, Nueva Regla	47
Figura 30. Utilización de Formato condicional para rellenar las celdas con valores igual y/o superiores a 1 (eventos húmedos)	48
Figura 31. Resultado obtenido de Formato Condicional. En azul: eventos húmedos. En rojo: eventos secos.....	49
Figura 32. Eventos secos y húmedos según el SPI a diferentes escalas en El Labrado.	50
Figura 33. Estructura de los datos de entrada.....	51
Figura 34. Script de Coherencia Wavelet, ejemplo Precipitación & VCI 1 El Labrado. Pasos del 2 al 5.	52
Figura 35. Resultado obtenido de la relación entre Precipitación y VCI El Labrado.....	53
Figura 36. Coherencia wavelet promedio por periodo entre Precipitación y VCI.	54
Figura 37. Identificación del ángulo de fase (A) y tiempo de desfase (B) del periodo correspondiente a 1 año.....	55
Figura 38. Estructura de los datos de entrada.....	57
Figura 39. Script de Coherencia Wavelet, ejemplo Índices climáticos & VCI 1 CHANLUD. Pasos del 1 al 4.	58
Figura 40. Resultados obtenidos de las relaciones entre los índices climático y el VCI Chanlud.	59
Figura 41. Resultado obtenido de la relación entre TNI y VCI Chanlud.	60
Figura 42. Eventos secos y húmedos según el SPI a diferentes escalas en Chanlud.....	61
Figura 43. Identificación del ángulo de fase (A) y tiempo de desfase (B) para el periodo de 1.3, 2 y 3.5 años respectivamente.....	62
Figura 44. Coherencia Wavelet entre las variables de reanálisis Humedad relativa (850 hPa), Humedad específica (850 hPa) y Temperatura (500 hPa) con el VCI Chanlud, a escala mensual.....	63

Índice de tablas

Tabla 1. Clasificación de eventos según el SPI	17
Tabla 2. Clasificación de sequía hidrológica según SSI.	21
Tabla 3. Datos requeridos para el cálculo del SPI, SSI y VCI, en el software R ...	22
Tabla 4. Datos de entrada requeridos para realizar las relaciones entre VCI y las diferentes variables climáticas.....	25

1. Presentación

El presente documento tiene por objetivo poner a disposición de la comunidad académica una guía metodológica para el cálculo de los índices de sequía meteorológica e hidrológica, y un índice que permita caracterizar el estado de la vegetación. Además, proporciona un análisis de la respuesta temporal histórica de la vegetación a la temperatura y precipitación, variables climáticas a escala sinóptica y a variables atmosféricas a escala local en épocas húmedas y secas. Las relaciones existentes evalúan la propagación (relaciones) entre sequías-vegetación, a través del método de Coherencia Wavelet.

Prueba de lectura

2.Introducción

La sequía, conocida comúnmente, como la disponibilidad de agua inferior a la normal, ocupa el primer lugar entre todas las amenazas naturales cuando se mide en términos del número de personas afectadas y pérdidas económicas asociadas con su ocurrencia. En efecto, se espera que para el futuro la sequía aumente, en frecuencia y gravedad, como consecuencia, principalmente, de la disminución de las precipitaciones regionales que dependen fuertemente de los procesos climáticos globales (Leng, Tang, y Rayburg, 2015).

Así, el cálculo de los índices de sequía es una herramienta de gran utilidad para detectar y monitorear estos eventos. Al igual que comprender el mecanismo de propagación de la sequía meteorológica a la sequía hidrológica, funciona como un sistema eficaz de seguimiento y de alerta temprana que puede ayudar a mitigar los posibles daños al sistema natural como a la sociedad. Se conoce que la propagación depende fuertemente de las características subyacentes, que incluyen el tipo de suelo, la topografía y la cubierta vegetal (Huang et al., 2017); por ende, es necesario también caracterizar la vegetación y evaluar su relación con las sequías.

La presente guía metodológica, muestra el procedimiento de cálculo para la caracterización de las sequías meteorológicas e hidrológicas, así como el estado de la vegetación (utilizado para el monitoreo de sequías agrícolas); además, indica cómo evaluar la relación entre las mismas, mediante el uso de Transformadas Wavelets.

3. Marco teórico

3.1. Conceptos fundamentales sobre índices de sequía

Sequía

Se define comúnmente como la disponibilidad de agua inferior a la normal, se considera también como una desviación del ciclo estacional al que están adaptados la sociedad y el ecosistema, lo que significa que las sequías también ocurren en la temporada de flujo alto (Van Loon y Laaha, 2015).

Sequía meteorológica

Se relaciona con la desviación de la precipitación respecto a la media durante un periodo de tiempo determinado (Valiente, 2001).

Sequía hidrológica

Hace referencia al déficit de caudal o volumen de aguas superficiales o subterráneas. Está determinada por la propagación de la sequía meteorológica a través del ciclo hidrológico terrestre, se define como la disminución en la disponibilidad de aguas superficiales y subterráneas durante un plazo temporal dado, respecto a los valores medios (Tallaksen y Van Lanen, 2004).

Índice de vegetación

Representa un valor generado tras el procesamiento de información satelital contenida en una imagen multibanda, dicho valor es sensible a la cobertura vegetal, por lo tanto, a través de los mismos se puede evaluar y monitorear el estado de la vegetación de un área determinada (Liu y Kogan, 1996).

3.2. Descripción de los índices climáticos y variables de reanálisis

Índices climáticos

Los índices a escala sinóptica empleados fueron seleccionados con base en estudios anteriores: Campozano et al., 2016, 2018; Esquivel-Hernández et al., 2019; Mendoza et al., 2019; Mora y Willems, 2012; Tobar y Wyseure, 2018; Vuille et al., 2000, y se describen a continuación:

BEST: Índice Bivariado El Niño-Oscilación del Sur, utiliza la combinación y normalización de la temperatura de la superficie del mar (TSM) en la región de El Niño 3.4 y SOI.

NAO: Oscilación del Atlántico Norte, se define como la alteración de la masa atmosférica entre las regiones subtropical y subpolar del océano Atlántico Norte, específicamente se basa en las fluctuaciones en la diferencia de presión a nivel del mar en la superficie entre la baja islandesa y la alta Azores.

NIÑO 1+2: es la reagrupación del índice de las regiones 1 y 2, se caracteriza por iniciar con una anomalía positiva de TSM frente al desarrollo del fenómeno del Niño. Estas regiones tienen una correlación significativa con la precipitación en la zona sur del Ecuador.

NIÑO 3: anomalías en la TSM promediadas en la región 5°S - 5° N, 90° - 150° O.

NIÑO 3.4: anomalías de la TSM promediadas entre las regiones NIÑO 3 y NIÑO 4. Se calcula en la región 5°S - 5° N, 90° - 150° O.

PDO: Oscilación Decadal del Pacífico, se define por el primer modo EOF de las anomalías de TSM en el Pacífico Norte.

SOI: Índice de Oscilación Sur, se deriva de la diferencia estandarizada de presiones atmosféricas entre Tahití (Polinesia Francesa) y Darwin (Australia). Los valores positivos se asocian con eventos de La Niña y los negativos, con El Niño.

TNA: Índice Tropical del Atlántico Norte, se determina con la TSM en la región 55° W - 15° W, 5° N - 25° N.

TNI: Índice Trans Niño, se define como la diferencia en anomalías de TSM normalizadas entre las regiones Niño 1 + 2 y Niño 4. Mide así el gradiente en anomalías de TSM entre el Pacífico ecuatorial central y oriental.

TSA: Índice Tropical del Atlántico Sur, es el indicador de la TSM en el golfo de Guinea en el Atlántico Sur oriental tropical. Se determina en la región 30° W -10° E, 20° S - 0°.

CAR: Índice TSM del Caribe, la serie temporal de anomalías de TSM promedio en el Caribe.

Variables de reanálisis

Se utilizaron las principales variables de reanálisis ERA 5 a escala mensual, para los niveles de 500 y 850 hPa. La descripción de cada uno se da a continuación.

Fracción de nubosidad: este parámetro es la proporción de cuadrícula cubierta por una nube (líquido o hielo) y varía entre cero y uno.

Altura geopotencial: este parámetro es la energía potencial gravitacional de una unidad de masa, en una ubicación particular, en relación con el nivel medio del mar. También es la cantidad de trabajo que habría que hacer, contra la fuerza de la gravedad, para elevar una unidad de masa a esa ubicación desde el nivel medio del mar.

Humedad relativa: este parámetro es la presión de vapor de agua como un porcentaje del valor en el cual el aire se satura (el punto en el que el vapor de agua comienza a condensarse en agua líquida o deposición en hielo). Para temperaturas superiores a 0 °C (273.15 K) se calcula la saturación sobre el agua. A temperaturas inferiores a -23 °C se calcula para la saturación sobre hielo. Entre -23 °C y 0 °C, este parámetro se calcula interpolando entre los valores de hielo y agua utilizando una función cuadrática.

Humedad específica: este parámetro es la masa de vapor de agua por kilogramo de aire húmedo. La masa total de aire húmedo es la suma del aire seco, el vapor de agua, el líquido de la nube, el hielo de la nube, la lluvia y la nieve que precipita.

Temperatura: este parámetro es la temperatura en la atmósfera. Tiene unidades de Kelvin (°K). La temperatura medida en Kelvin se puede convertir a grados Celsius (°C) restando 273.15.

3.3. Conceptos fundamentales wavelets

Transformada Wavelet

Para entender de mejor manera esta herramienta, es necesario cuestionarnos ¿qué es una wavelet?

Los datos o señales del mundo real muestran tendencias u oscilaciones que cambian lentamente y pueden estar marcadas o interrumpidas por cambios abruptos que proporcionan información útil para realizar un análisis detallado de datos. La transformada de Fourier es la técnica comúnmente utilizada para el tratamiento de datos; sin embargo, no es eficiente cuando se analiza señales reales con variaciones o discontinuidades abruptas, puesto que esta técnica matemática pierde la información del tiempo cuando se pasa la señal analizada a la base de la frecuencia (Buzai et al., 2015). Para corregir la deficiencia de la transformada de Fourier, se adaptó y desarrolló la transformada corta de Fourier (TCF), que consiste en dividir en partes a la señal que se analiza y estudiar el contenido frecuencial de cada sección. Por ello, se utiliza una función ventana, de esta manera se logra obtener información sobre cuándo y en qué frecuencias ocurre un evento de señal. El inconveniente de esta técnica, es la precisión limitada determinada por el tamaño de la ventana de tiempo, cuyo tamaño debería variar según las frecuencias bajas o altas; sin embargo, la TCF permite la elección de un tamaño de ventana fijo para todas las frecuencias, restringiendo el análisis detallado y flexible de la señal.

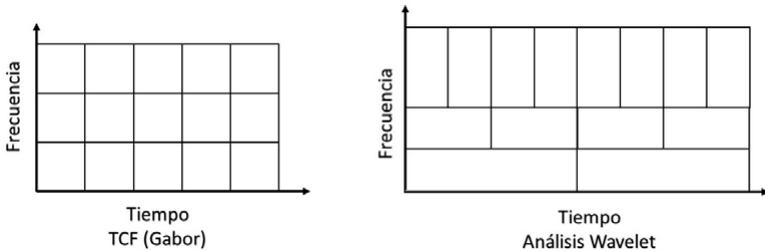
Entonces al ser la transformada de Fourier útil y efectiva únicamente para el análisis de series estacionarias, surge el tema de las wavelets. Asumiendo que se tiene una función wavelet, $\psi_0(\eta)$, que depende de un parámetro de tiempo adimensional η , para ser admisible como una wavelet, debe tener una media igual a cero y estar localizada tanto en frecuencia ($\Delta\omega$) como en tiempo (Δt) (Torrence y Compo, 1998); es decir, a diferencia de las ondas sinusoidales utilizadas en Fourier que oscilan infinitamente, una wavelet debe estar localizada en un tiempo finito. Las wavelets pueden ser de diferentes tamaños y formas, lo que se conoce como familia wavelets, las cuales se deben seleccionar de acuerdo a la finalidad de la aplicación (Grinsted, Moore y Jevrejeva, 2004).

A partir de los principios anteriores, se desarrolla la denominada transformada wavelet, que permite examinar señales en el plano tiempo-frecuencia. Tiene la ventaja de proporcionar un análisis mejorado de áreas con cambios bruscos

localizados de una señal, pues utiliza ventanas de tiempo con regiones de tamaño variable. Esto permite el uso de intervalos de tiempo largos para obtener información más precisa de baja frecuencia e intervalos cortos para información de alta frecuencia (Figura 1).

Figura 1.

Comparación de las ventanas de tiempo en el análisis TCF y Wavelet.



Fuente: (Grinsted et al. 2004).

Existen dos conceptos importantes dentro de la transformada wavelet: escala y desplazamiento.

Escala

La escala representa lo que coloquialmente se conoce como estirar o reducir una señal en el tiempo, se puede representar mediante la ecuación (1):

$$\psi\left(\frac{t}{s}\right) \quad s > 0 \quad (1)$$

S es el factor de escala, cuyo valor es positivo e indica a cuánto se escala la señal en el tiempo. Existe una relación inversamente proporcional entre escala y frecuencia, que se resume en que a escalas pequeñas se analizan las frecuencias altas y a escalas grandes las frecuencias bajas. Un ejemplo claro es el analizar datos de temperatura para detectar cambios en diferentes escalas. Con escalas altas se podría observar los cambios de un año a otro o de una década a otra, mientras que con escalas bajas se puede examinar cambios que ocurren día a día.

Dicho de otro modo, si escalamos una onda sinusoidal en 2, es igual a reducir su frecuencia original a la mitad o por una octava; pero como las wavelets no son ondas sinusoidales, no se puede reducir directamente su frecuencia original, sino que se obtiene primero una frecuencia equivalente. Esta utiliza una constante de proporcionalidad denominada frecuencia central de la wavelet (C_f), que tiene una relación recíproca con la escala y frecuencia y se calcula como la potencia pico en la transformada de Fourier de la wavelet. La frecuencia equivalente se define con la siguiente ecuación (2):

$$F_{eq} = \frac{C_f}{s \, dt} \quad (2)$$

Donde C_f es la frecuencia central de wavelet, s es la escala wavelet y dt es el intervalo de muestreo. De esta forma, si escalamos una wavelet por un factor de 2, su frecuencia equivalente se divide entre 2.

Desplazamiento o posición

Desplazar una wavelet significa retrasar o avanzar su inicio a lo largo de la longitud de una señal. Se representa mediante la notación $\varphi(t-k)$, que significa que la wavelet está desplazada y centrada en k .

Existen dos clases principales de transformada wavelet: Transformada Wavelet Continua (CWT, por sus siglas en inglés) y Transformada Wavelet Discreta (DWT, por sus siglas en inglés). La primera se considera más adecuada para extraer características en una serie de tiempo (Grinsted et al., 2004), puesto que tiene la capacidad para describir el comportamiento local de las señales en diferentes escalas de tiempo; mientras que la segunda, la transformada discreta, se utiliza comúnmente para la reconstrucción de señales utilizando wavelet bases, un ejemplo de su aplicación es la compresión de datos. El término wavelet bases se usa para referirse a un conjunto de wavelets ortogonales (con ángulo recto).

Transformada Wavelet Continua (CWT)

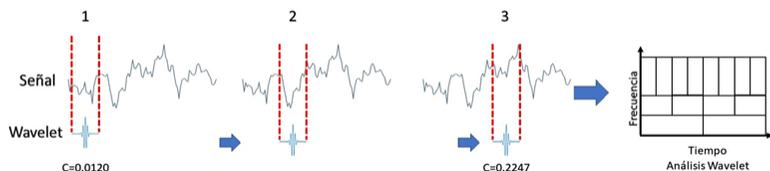
Se utiliza esta transformación generalmente para realizar un análisis simultáneo de tiempo-frecuencia de una señal. El principio básico de la CWT es obtener coeficientes, que son una función de escala o frecuencia y tiempo, y mide la similitud entre una señal y una función de análisis. Cuanto mayor sea su valor absoluto, mayor similitud o más transiciones abruptas se registran en

las señales. En este caso, la señal corresponde a la serie de tiempo y la función es una wavelet prototipo (wavelet madre).

En la Figura 2, se representa un esquema básico de la CWT, dónde en primer lugar, la wavelet madre se compara con una sección al inicio de la señal y se obtiene un valor del coeficiente wavelet (C). En el segundo punto, se desplaza la wavelet a la derecha y se calcula un nuevo valor de C, este procedimiento se repite hasta cubrir toda la longitud de la señal. En el tercer punto, se cambia la escala de la wavelet (estira o comprime) y se vuelven a repetir los pasos 1 y 2. Los tres pasos se realizan para todas las escalas, obteniendo como resultado una matriz de coeficientes cuyo valor varía según la escala o frecuencia y el intervalo de tiempo.

Figura 2.

Esquema de la transformación wavelet continua.



Proceso de construcción de escalas de wavelets

Como ya se mencionó anteriormente, si escalamos una wavelet en un factor 2, su frecuencia equivalente también se reduce a la mitad o en una octava. La CWT, analiza la señal en escalas intermedias dentro de cada octava, este parámetro se conoce como el número de escalas por octava (N_v), permitiendo un análisis de escala fina. Los valores típicos para este parámetro son 10, 12, 16 y 32 (Tabla 1). Las escalas mínima y máxima para el análisis se determinan automáticamente mediante la función CWT de acuerdo a la distribución de la energía de la onda.

Tabla 1.

Ejemplo de escalas intermedias dentro de una octava ($N_v = 10$).

Escala: 2^1	$2^{11/10}$	$2^{12/10}$	$2^{13/10}$	$2^{14/10}$	$2^{15/10}$	$2^{16/10}$	$2^{17/10}$	$2^{18/10}$	$2^{19/10}$	Escala: 2^2
-------------------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------------------

Elección de la wavelet madre

Existen diferentes familias wavelets desarrolladas según el propósito del análisis. Para transformadas discretas se utilizan generalmente las familias Daubechies, Haar, Symlets y Coiflets. Por otra parte, para transformadas continuas se utilizan Gauss, Morlet y Mexican hat (Misiti, 2007).

Comúnmente para estudios de series de tiempo geofísicas se utiliza la familia Morlet, que permite una mejor extracción de las características de una señal al proveer un buen balance entre localización de tiempo y frecuencia. La wavelet Morlet se define según la ecuación (3) (Grinsted et al., 2004).

$$\psi_0(\eta) = \pi^{-1/4} e^{i\omega_0\eta} e^{-\frac{1}{2}\eta^2} \quad (3)$$

Dónde, ω_0 es una frecuencia adimensional, considerada igual a 6 para satisfacer la condición de admisibilidad, y η es el tiempo multiplicado por un factor de escala.

De esta manera, suponiendo que se tiene una serie de tiempo, x_n , con intervalos iguales de tiempo δt y $n=0 \dots N-1$, la transformada continua de x_n es definida como la convolución de x_n con una versión escalada y desplazada de ψ_0 , como se muestra en la ecuación (4).

$$W_n^X(s) = \sqrt{\frac{\delta t}{s}} \sum_{n'=1}^N x_{n'} \psi_0 \left[(n' - n) \frac{\delta s}{s} \right] \quad (4)$$

Donde δt es el intervalo de tiempo de análisis, s la escala, x_n la serie de tiempo, la wavelet madre determinada (Grinsted et al., 2004).

Finalmente, se puede definir el espectro de potencia wavelet como, el mismo que se utiliza para representar la energía contenida en la serie de tiempo.

Cono de influencia

Debido a que las series de tiempo son de longitud finita, se producen errores al principio y al final de la transformada. Para solucionar este problema, se introduce el cono de influencia (COI, por sus siglas en inglés),

¹ *Convolución* se refiere a la transformación de dos funciones en una tercera función que representa la magnitud en la que se superponen la primera función y una versión trasladada de la segunda función.

donde los resultados fuera o cerca de los límites del cono deben tratarse cuidadosamente debido a que los efectos de borde se vuelven importantes en esta región, siendo necesario analizar si los datos obtenidos son producto de la casualidad o de un verdadero cambio en la varianza de las series (causalidad) (Torrence y Compo, 1998).

Nivel de significación

Para calcular la significancia estadística del espectro de poder wavelet, se utiliza el método propuesto por Torrence y Compo (1998), que consiste básicamente en generar un espectro aleatorio de fondo y compararlo con el espectro de la serie de tiempo. La hipótesis nula es: la señal de la serie de tiempo se genera mediante un proceso estacionario con un espectro de potencia de fondo. Para este método se utiliza un significativo al nivel del 5 %, que es equivalente a un nivel de confianza del 95 %.

Si se desea analizar la similitud entre dos espectros wavelet, es difícil e impreciso únicamente comparar la potencia wavelet de cada uno por separado; es por eso que se han desarrollado procedimientos como la transformada wavelet cruzada y a partir de esta la coherencia wavelet.

Transformada Wavelet Cruzada

Identifica las áreas en común con alta energía entre las series. Su principio básico es el siguiente:

Suponiendo que $W_n^X(s)$ y $W_n^Y(s)$, son transformadas wavelets continuas de dos series de tiempo: $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ y $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_n\}$, la transformada wavelet cruzada entre ellos sería $W_n^{XY}(s) = W_n^X(s)W_n^{Y*}(s)$, donde $W_n^{Y*}(s)$ representa el complejo conjugado $W_n^Y(s)$ de y y s es la escala (Lin et al., 2017).

Coherencia Wavelet

Es un procedimiento para analizar las bandas de frecuencias asociadas entre sí de dos series de tiempo, constituye el equivalente a realizar un análisis de correlación, con lo cual se identifica los periodos con ciclos semejantes, aunque la potencia común sea baja. La coherencia Wavelet mide la covarianza entre las series X y Y , en el plano tiempo-frecuencia, utilizando como base otro procedimiento derivado conocido como transformada wavelet cruzada.

Este coeficiente de correlación localizado en el espacio tiempo-frecuencia, se define en la ecuación 5 (Grinsted et al., 2004):

$$R_n^2(s) = \frac{|S(s^{-1}W_n^{XY}(s))|^2}{S(s^{-1}|W_n^X(s)|^2) \cdot S(s^{-1}|W_n^Y(s)|^2)} \quad (5)$$

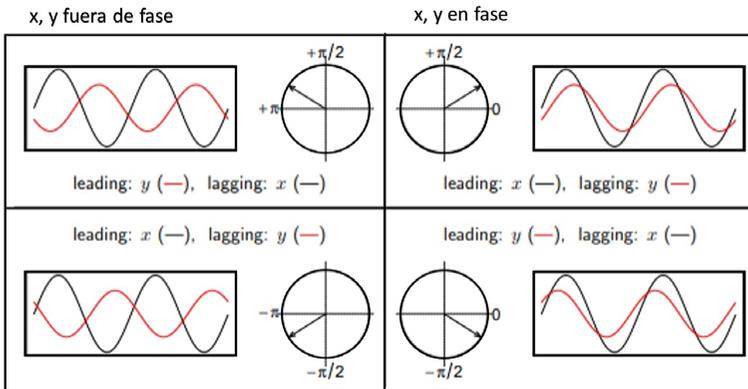
Donde R^2 , representa la coherencia cuadrática, mientras más cercano a 1, denota una mayor correlación, S es un operador de suavizado que depende de la familia wavelet utilizada y, es el espectro wavelet cruzado.

Análisis de fase

La fase entre series, suele indicarse mediante vectores, siendo una correlación positiva cuando los vectores tienen sentido hacia la derecha (en fase), y negativa cuando el sentido de los vectores es hacia la izquierda (anti fase). Conociendo el ángulo de fase de estos vectores es posible transformarlo a unidades de tiempo, con respecto a un periodo o frecuencia específica, lo cual permitiría establecer el tiempo aproximado de respuesta de una serie con respecto a la otra. En la Figura 3 se muestra un diagrama tomado de la guía "WaveletComp", donde se ilustra el rango de posibles diferencias de fase y su interpretación.

Figura 3.

Diferencia de fase y su interpretación.



Leading: Serie adelantada o que lidera. Lagging: Serie retrasada

4. Metodología

4.1. Índice de precipitación estandarizado (SPI)

Para analizar los eventos de sequía meteorológica, se utilizó el Índice de Precipitación Estandarizado (SPI). El SPI determina el déficit o exceso de precipitación en un lugar y periodo establecido. Este índice se calculó a escala mensual (SPI1), trimestral (SPI3), semestral (SPI6) y anual (SPI12); siguiendo la metodología propuesta por (McKee, Doesken y Kleist, 1993). Los datos son ajustados a una distribución de probabilidad gamma que posteriormente es transformada a una distribución normal estandarizada para la obtención del índice. La clasificación de eventos se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2.

Clasificación de eventos según el SPI.

Categoría	Valor SPI
Sequía Extrema	$(-\infty, -2]$
Sequía Severa	$(-2, -1.5]$
Sequía Moderada	$(-1.5, -1]$
Normal	$(-1, 1)$
Moderadamente húmedo	$[1, 1.5]$
Muy húmedo	$[1.5, 2)$
Extremadamente húmedo	$[2, \infty)$

4.2. Índice de caudal estandarizado (SSI)

La sequía hidrológica se caracterizó mediante el Índice de Caudal Estandarizado SSI, para lo cual se siguió la metodología propuesta por Vicente-Serrano (2012), similar al cálculo del SPI. Para ello los datos de caudales se agruparon según la escala analizada y se filtraron por meses (enero a diciembre), obteniendo 12 series, mismas que fueron ajustadas a diferentes distribuciones de probabilidad: Chi cuadrado, Gamma, Logística, Log-normal, Normal y Weibull. Mediante el test estadístico de bondad de ajuste de Anderson-Darling (AD) (Scholz y Stephens, 1987), se determinó la distribución teórica que mejor representa el comportamiento de los

caudales analizados. Con ello, la distribución de probabilidad seleccionada se transformó a una distribución normal a fin de obtener el SSI (Vicente-Serrano et al., 2012). La clasificación se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3.

Clasificación de sequía hidrológica según SSI.

Categoría	Valor SPI
Sequía Extrema	$(-\infty, -2]$
Sequía Severa	$(-2, -1.5]$
Sequía Moderada	$(-1.5, -1]$
Sequía Suave	$[-1, 0)$
Normal	$(-1, 1)$

Con base en la clasificación presentada, se establecen los umbrales a partir de los cuales se considera la ocurrencia de un evento seco o húmedo, siendo así, valores inferiores a -1 y superiores a 1, para eventos secos y húmedos respectivamente.

4.3. Índice de condición de la vegetación (VCI)

Para caracterizar el estado o condición de la vegetación, un índice ampliamente utilizado es el Índice de Condición de la Vegetación (VCI). Este índice es calculado a partir del valor del Índice de Vegetación Mejorado (EVI) o el Índice de Vegetación Normalizado (NDVI).

El VCI se calcula para cada pixel y mes de un año dado (ecuación 6), siguiendo la metodología propuesta por (Kogan, 1997):

$$VCI = \frac{EVI - EVI_{min}}{EVI_{max} - EVI_{min}} \quad (6)$$

dónde EVI (Índice de Vegetación Mejorado, por sus siglas en inglés) es el valor para cada pixel y mes y EVI_{min} y EVI_{max} son los valores mínimos y máximos de EVI durante todo el periodo analizado, para el pixel y mes considerado.

Los valores del VCI se obtienen en un rango de 0 a 100 %, dónde aquellos meses dónde el rango sea inferior al 40 %, indica una vegetación en malas

condiciones que aumenta su gravedad mientras más cercano esté a 0 %. Valores superiores a 40 % representan una vegetación en buenas condiciones.

Para evaluar las relaciones entre los índices climáticos y variables de reanálisis con el VCI, se utilizó como ejemplo, los datos de las cuencas de aporte a los embalses de El Labrado y Chanlud, mientras que para determinar épocas secas y húmedas se usó los datos mensuales del SPI de las estaciones El Labrado y Chanlud, pertenecientes a la cuenca del Río Machángara (Figura 4) y manejadas por ELECAUSTRO. Se utilizó también, los índices climáticos disponibles en el sitio web de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA, <https://psl.noaa.gov/data/climateindices/list/>), y los productos de reanálisis disponibles en el sitio web del Servicio de Cambio Climático de Copérnico implementado por el Centro Europeo para Pronósticos Meteorológicos de Mediano alcance (ECMWF, <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!dataset/reanalysis-era5-pressure-levels-monthly-means?tab=overview>). Los datos de índices climáticos y variables de reanálisis se refieren a los descritos en la sección 3.2.

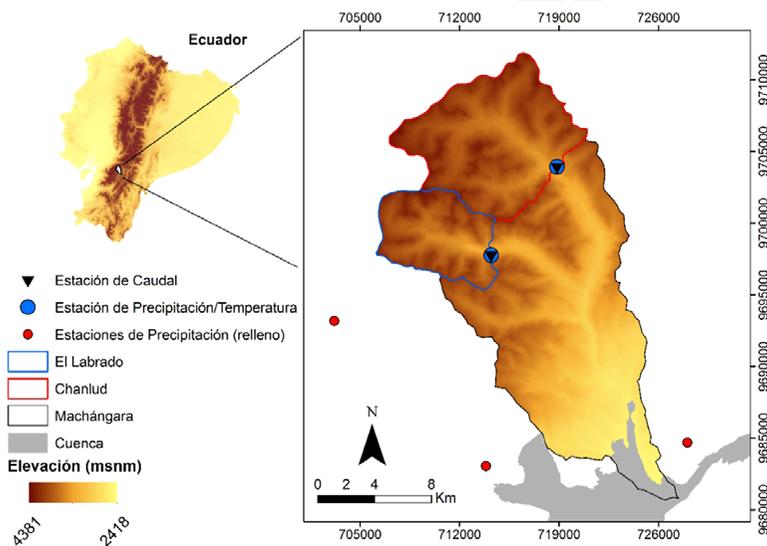
Prueba de lectura

5. Caso de estudio

Con el objetivo de presentar el procedimiento de cálculo de los diferentes índices de sequía y su propagación, la cuenca del río Machángara fue considerada como caso de estudio. Para el cálculo del SPI, se utilizó como ejemplo la serie de datos mensual de precipitación de la estación de El Labrado, y para el SSI, la serie de datos mensual de caudal de la estación Chanlud, pertenecientes a ELECAUSTRO. Por otro lado, para el cálculo del VCI, la cuenca de aporte al embalse de El Labrado fue utilizada como ejemplo. Las estaciones y cuencas de aporte, se muestran a continuación:

Figura 4.

Ubicación de las estaciones de precipitación y de caudal, así como de las cuencas de aporte a los embalses de El Labrado y Chanlud



5.1. Recopilación de la información

Se requieren datos de precipitación, caudal e imágenes EVI a escala mensual, para el cálculo del SPI, SSI y VCI, respectivamente. Los datos de entrada para el cálculo de los índices de sequía, se sugiere que tengan un registro continuo de información de al menos treinta años, según las recomendaciones de la Organización Meteorológica Mundial (OMM), con menos del 10 % de datos ausentes en la serie temporal. Se debe realizar un control de calidad de los datos y proceder a rellenarlas, escogiendo un método de acuerdo a la necesidad y disponibilidad de datos. Para el cálculo del VCI se debe descargar el producto MOD13Q1.006 mismo que contiene los valores de EVI (o NDVI) a una escala temporal de 16 días y resolución espacial de 250 metros. El procedimiento de obtención de estos datos se presenta en la sección 5.4. En la Tabla 4 se enlistan los datos requeridos para determinar los índices de sequía, vegetación y analizar la propagación entre sequías.

Tabla 4.

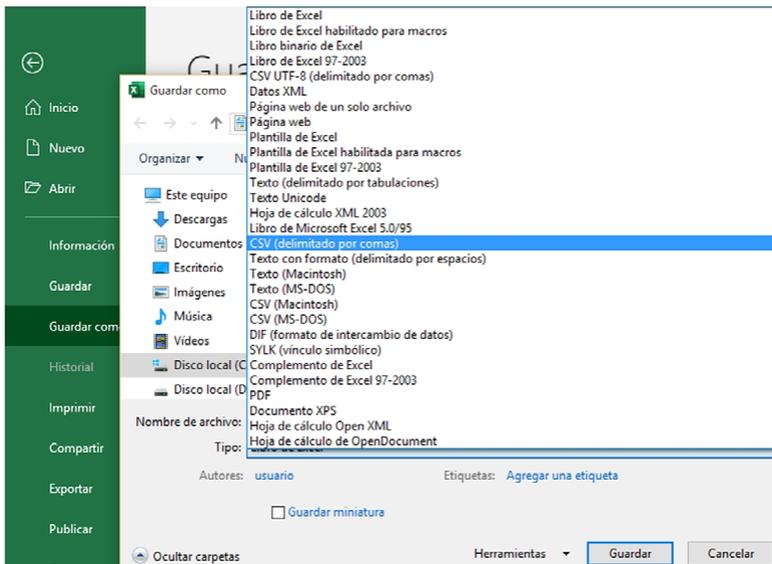
Datos requeridos para el cálculo del SPI, SSI y VCI, en el software R.

No.	Datos de entrada	Formato	Estructura de la base de datos
1	Precipitación	.csv (delimitado por comas)	Columna 1: Fecha Columna 2: Precipitación mensual
2	Caudal	.csv (delimitado por comas)	Columna 1: Fecha Columna 2: Caudal mensual
3	Índice de Vegetación Mejorado (EVI)	.nc	RasterBrick

El formato .csv, se selecciona desde Microsoft Excel de la siguiente manera: Guardar como>Seleccionamos la carpeta>Introducir nombre del archivo>En Tipo, seleccionar CSV (delimitado por comas), como se muestra en la Figura 5.

Figura 5.

Selección del formato de los datos de entrada: CSV (delimitado por comas).



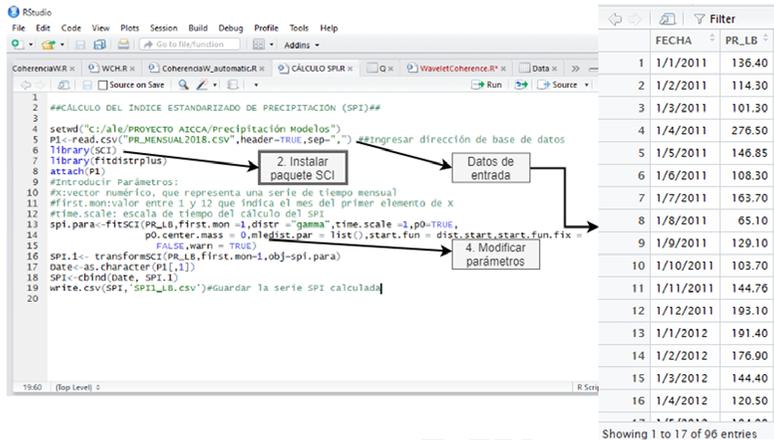
5.2. Cálculo del SPI

El cálculo del SPI se realiza en el software R, utilizando el paquete “SCI”. A continuación, se describe el proceso para el cálculo del SPI en la estación de El Labrado a escala mensual (Figura 6):

1. Abrir el Script “Cálculo SPI”
2. Instalar el paquete SCI (clic en el comando Run o Ctrl + Enter)
3. Modificar la dirección donde se guardó la base de datos de precipitación en la función setwd (línea 4)
4. En la línea 13 del script, modificar fisrt.mon que corresponde el número de mes (1=Enero, 12=Diciembre) con que inicia la base de datos de precipitación, y time.scale que corresponde al nivel de agrupamiento del SPI
5. Ejecutar el resto del código (clic en el comando Run o Ctrl + Enter)

Figura 6.

Ejemplificación del proceso de cálculo del SPI 1 El Labrado.



Interpretación de los resultados

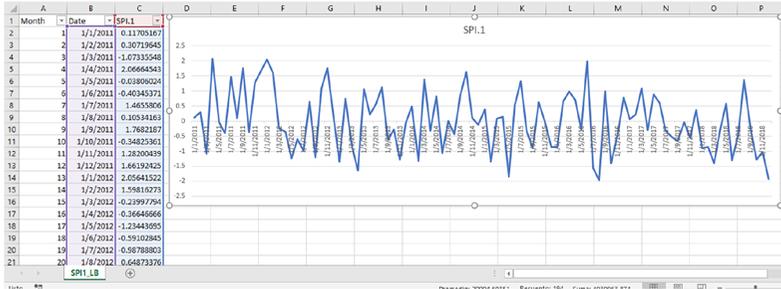
Tras la ejecución del Script “Cálculo del SPI”, se obtiene un archivo de extensión .csv, que contiene la serie temporal del SPI en la escala temporal seleccionada. Estos resultados se pueden graficar en Excel, Grapher o cualquier otro programa para identificar y clasificar los eventos de sequía. En este caso, se realiza el proceso de clasificación en Excel de la siguiente manera:

1. Seleccionamos las columnas “Fecha” y “SPI”
2. Damos clic en Insertar
3. Seleccionamos Gráfico de Líneas, con lo cual se obtienen los resultados mostrados en la Figura 7

Se puede realizar un análisis de frecuencias e intensidades, con la herramienta Tabla Dinámica o Filtro, según se requiera la información.

Figura 7.

Gráfico de los resultados de la serie SPI 1 El Labrado, en Excel



5.3. Cálculo del SSI

1. Agrupación de datos en Excel. Los datos de caudal mensual se suman de acuerdo al nivel de agrupamiento del SSI, por ejemplo, para calcular el índice en escala trimestral, para cada mes del año y cada estación, se calcula el valor acumulado de la suma del mes en análisis y los dos meses anteriores (Figura 8).

Figura 8.

Estructura de los datos de entrada (agrupación trimestral de caudal)

	A	B	C	D
1	MES	Q_Ch1	Q_Ch3	
2	1	1.9		
3	2	3.24		
4	3	4.78	9.92	.=SUMA(B2:B4)
5	4	5.63	13.65	.=SUMA(B3:B5)
6	5	3.9	14.31	
7	6	3.61	13.14	
8	7	3.02	10.53	
9	8	2.37	9.01	
10	9	3.59	8.98	
11	10	2.43	8.39	
12	11	1.3	7.32	
13	12	1.4	5.14	
14	1	2.52	5.22	
15	2	1.95	5.87	
16	3	3.67	8.13	
17	4	3.76	9.37	
18	5	2.94	10.36	
19	6	4.97	11.67	
20	7	2.9	10.81	
21	8	3.57	11.44	

2. Una vez agrupados los datos, en R, mediante el script “Cálculo SSI”, se procede a filtrarlos por meses durante el periodo de análisis, de esta manera se obtienen 12 series (enero a diciembre) cuya longitud depende del periodo de análisis (2000-2018) (Figura 9A), posteriormente en cada serie se ajustan las distribuciones de probabilidad: Chi cuadrado, Gamma, Logística, Log-normal, Normal y Weibull. Mediante el test estadístico de bondad de ajuste de Anderson-Darling (AD) se determinó la distribución teórica que mejor representa el comportamiento de los caudales analizados. Para este paso es necesario el paquete “riskDistributions”, mediante la cual al ejecutar fit.cont de la serie mensual analizada, muestra una interfaz que permite seleccionar la distribución que mejor se ajusta de acuerdo al test de bondad AD (Figura 9B).
3. La distribución teórica que mejor represente el comportamiento de los caudales analizados, se transforma a una distribución normal con una media de 0 y desviación de 1 e introduciendo los parámetros que se obtienen del paso 2 (Figura 9C). Los valores obtenidos corresponden al índice de sequía de caudal estandarizado SSI, para el mes analizado.

Figura 9.

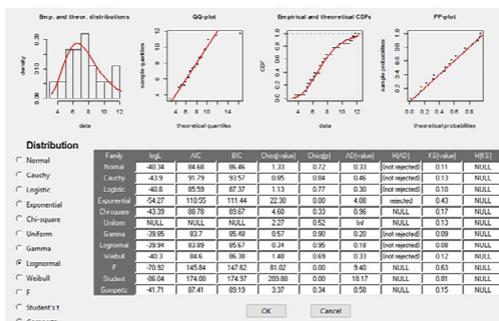
A) Filtración de datos por meses; B) selección de la distribución de probabilidad que mejor se ajusta a las series mensuales; C) normalización de la serie.

A

```

1 0 <- read.csv("C:/Users/PROYECTO/ANEXO/INT_CSV/ChenHub-ElecAstro/ChenHub.csv", header=TRUE)
2 opt<-ltrim(max.pr.int = 99999)
3 attach(opt)
4 library(lubridate)
5 library(dplyr)
6
7 #filtración de cada1 por mes05
8 #reintroducir "na,omit" en caso de vacíos al inicio de la serie
9 DAT051<-na.omit(Filter(Q.MES=1))
10 DAT052<-na.omit(Filter(Q.MES=2))
11 DAT053<-na.omit(Filter(Q.MES=3))
12 DAT054<-na.omit(Filter(Q.MES=4))
13 DAT055<-na.omit(Filter(Q.MES=5))
14 DAT056<-na.omit(Filter(Q.MES=6))
15 DAT057<-na.omit(Filter(Q.MES=7))
16 DAT058<-na.omit(Filter(Q.MES=8))
17 DAT059<-na.omit(Filter(Q.MES=9))
18 DAT0510<-na.omit(Filter(Q.MES=10))
19 DAT0511<-na.omit(Filter(Q.MES=11))
20 DAT0512<-na.omit(Filter(Q.MES=12))
  
```

B



C

```

22 #AJUSTE POR MES A UNA DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD#
23 library(rriskDistributions)
24 mat <- matrix(1,19,12) #matriz donde se guarda resultados (19#años analizado, 12: meses del año)
25 attach(DAT051) #CAMBIAR PARA CADA MES 1-12
26 Nmes<-1 #CAMBIAR PARA CADA MES 1-12
27 i_Q_ch3#cambar según SSI a calcular (Q1,Q3,Q6,etc.)
28 res2<-fit.cont(data2fit=1) #seleccionar la de mejor ajuste aquella con el valor más bajo del test A
29 v<-res2[[3]]
30 t<-res2[[2]]
31
32 #NORMALIZACIÓN DE LA CURVA CON MEJOR AJUSTE POR CADA MES-ENERO-DICIEMBRE#
33
34 if(t=="norm"){
35   output<-qnorm(qnorm(t, mean=v[[1]], sd=v[[2]]), mean = 0, sd = 1)
36 } else if (t=="weibull"){
37   output<-qnorm(pweibull(i, shape=v[[1]], scale = v[[2]]), mean = 0, sd = 1)
38 } else if (t=="logis"){
39   output<-qnorm(plogis(t, location=v[[1]], scale = v[[2]]), mean = 0, sd = 1)
40 } else if (t=="lnorm"){
41   output<-qnorm(plnorm(t, meanlog=v[[1]], sdlog = v[[2]]), mean = 0, sd = 1)
42 } else if (t=="gamma"){
43   output<-qnorm(pgamma(t, shape=v[[1]], rate = v[[2]]), mean = 0, sd = 1)
44 } else if (t=="chisq"){
45   output<-qnorm(pchisq(t, df=v[[1]], npc = 0), mean = 0, sd = 1)
46 } else{
47   "Error"
48 }
49 }
50
  
```

4. Los resultados finales se pueden graficar utilizando cualquier herramienta o como se ejemplificó en el cálculo del SPI, en Microsoft Excel (Figura 10).

Figura 10.

Representación de los resultados obtenidos del índice SSI en Excel.

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGOST	SEPT	OCT	NOV	DIC
1	NA	NA	0.1119850687	0.45690559	0.22120818	-0.42915185	-0.99817655	-1.03254822	-0.32560256	0.13347311	0.0794142794	-1.2584710
2	-1.01508843	-0.9640575	-0.4872923739	-0.60646001	-0.90875378	-0.97903410	-0.90938817	-0.31449675	-0.28059459	-0.21088714	-0.9731424593	-1.2038698
3	-0.50883235	-0.7671193	-1.2219982810	-1.04265396	-0.98729305	-1.28690938	-1.22747010	-0.94375750	-0.77535244	-0.69918290	0.0065794452	0.5221914
4	0.29699613	-0.9304097	-1.8739835794	-1.94757461	-0.60492772	-0.50740985	0.04902091	-0.72808716	-0.28059459	-0.44950336	-0.6883974653	-0.3483341
5	0.15032338	-0.1976832	-0.6982456651	-1.01115199	-1.13903183	-0.53258980	-0.45331375	-0.21114788	-0.38679702	0.07159272	0.2533289465	0.2234415
6	-0.45145300	-0.4243621	0.0006619636	0.33202008	0.08664292	-0.39051285	-0.85659617	-0.97633805	-1.32770830	-1.56261481	-0.4285879403	0.3729594
7	0.64603596	0.7819924	0.3901733761	0.29498774	-0.32825262	-1.24045443	-1.32513850	-1.19365379	-0.66344290	-0.65546914	0.0009223319	0.8003459
8	0.97749203	0.4609836	-0.0533728518	0.04047445	-0.01125307	0.76184962	0.28134249	0.52818134	0.10442687	0.56709265	1.6414350172	1.9069847
9	1.59404242	1.5474589	1.5346333328	1.43147577	1.57133561	1.38382196	1.39953582	1.01997820	1.30411279	1.38767548	2.2316491217	1.8126860
10	1.37315475	0.9725889	0.5986879685	0.07860519	-0.49221808	-0.39751420	-0.50568324	-0.42152427	-0.68407783	-0.69369018	-0.9803428780	-0.8623426
11	-1.15999566	-0.2201150	-0.7463036018	-0.55267915	-0.85846640	-0.18189869	-0.02969125	-0.14334274	-0.49088211	-1.14263648	-1.9710748342	-1.3217903
12	-0.07613881	0.5868041	-0.0856169022	0.75158870	1.68416628	2.82739746	2.80752185	1.93857477	2.03247589	0.53579564	1.2901709217	1.1996168
13	1.51648357	1.7964256	2.6023406373	2.43561814	2.26955591	0.66815647	-0.56735197	-0.22897944	-0.03058667	-0.04156625	0.9282483422	0.9666335
14	0.62390904	0.2177564	-0.0056449822	-0.69220780	-1.62579299	-1.24886623	1.27221482	2.65400733	2.68633247	2.98116382	-0.2200994078	-0.6881774
15	-0.99054047	-1.1495313	-0.2797627808	-0.25784953	0.08918250	-0.09247667	-0.08565468	-0.15827898	-0.19275549	0.68591348	0.6193933461	0.6022242
16	0.07659388	0.3567646	0.3342985723	0.36643631	0.33189156	0.90951306	0.83448932	0.95174712	0.74762742	0.70847414	0.1618640689	-0.7778050
17	-2.23686036	-2.1353353	-0.2080147744	0.31900517	0.38594712	0.64303501	0.22138130	0.10441745	-0.73284436	-0.77695509	-1.2561434309	-1.0518171
18	-0.06695090	0.9155959	1.2301354771	0.94273179	0.85657189	0.16588171	-0.17515143	-0.82307401	-0.91452428	-0.76015060	-0.3537765907	-0.3797959

5.4 Cálculo del VCI

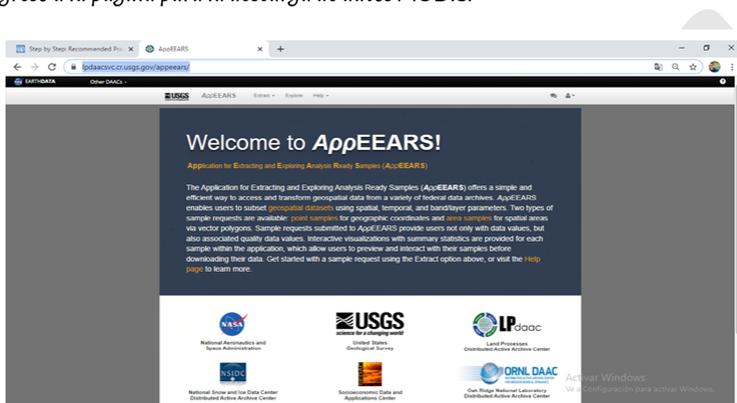
Para el cálculo del VCI se siguen estos pasos:

1. Descargar datos MODIS en formato netCDF de AppEEARS (Figura 11).

- a. Ingresar a la página AppEEARS (Figura 11) (<https://lpdaacsvc.cr.usgs.gov/appeears/>).

Figura 11.

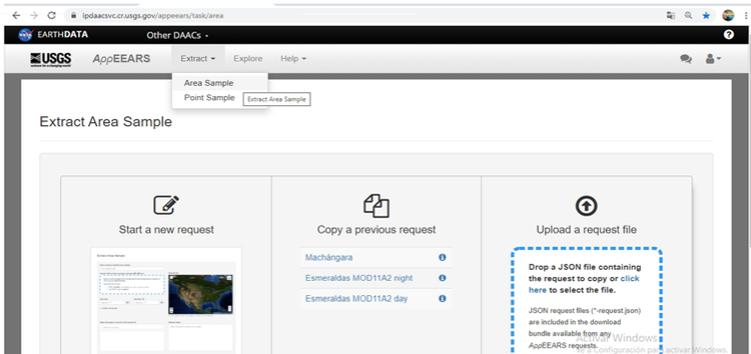
Ingreso a la página para la descarga de datos MODIS.



b. Dar clic en “Extract” y elegir la opción “Area Sample” (Figura 12).

Figura 12.

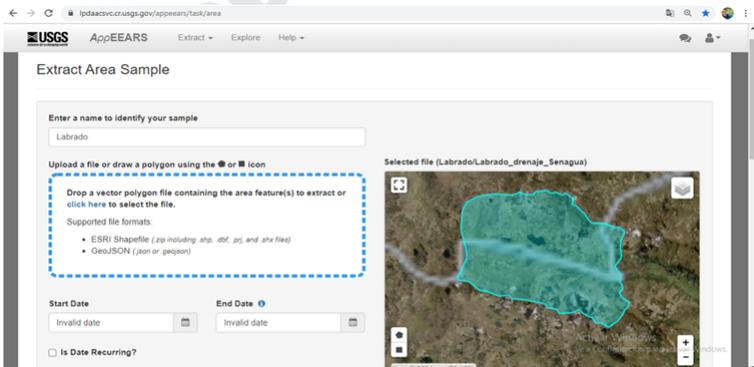
Elección de la opción “Area Sample”.



c. En la nueva ventana que aparece cargamos el área de estudio (Figura 13).

Figura 13.

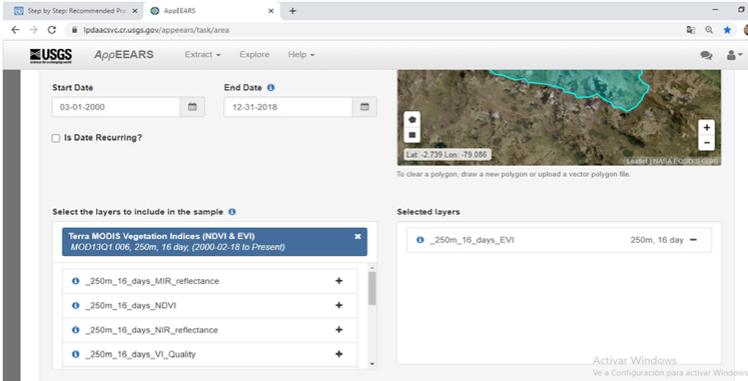
Ejemplo de cómo cargar el área de estudio en la página.



d. Una vez cargado el área de estudio se seleccionan los periodos de descarga de las imágenes, así como el producto satelital (Figura 14).

Figura 14.

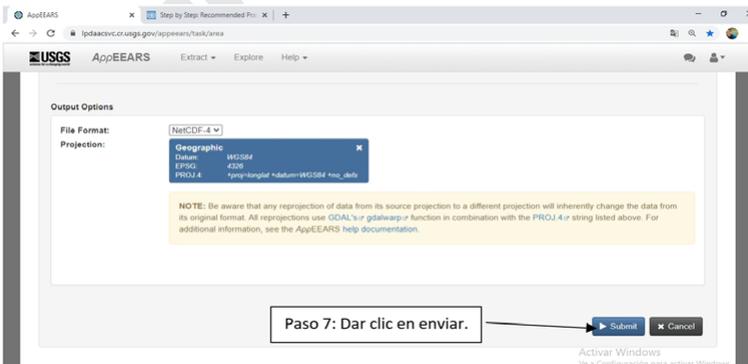
Elección del período de las imágenes y el producto satelital.



e. A continuación, se selecciona el formato de descarga que para nuestro estudio es el formato “NetCDF-4”, así como la proyección “Geographic” (Figura 15).

Figura 15.

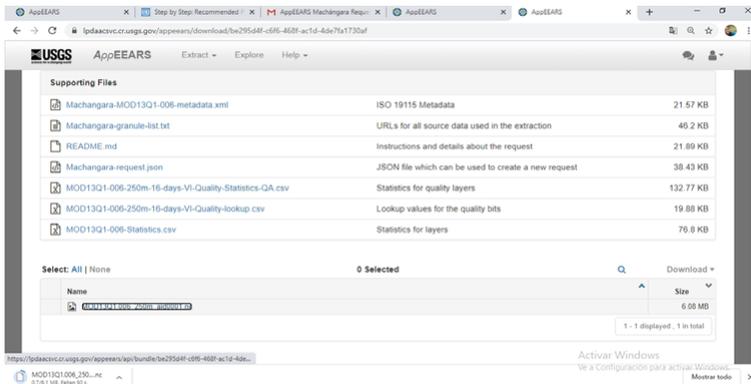
Elección del formato de descarga de los datos satelitales.



f. Finalmente se ingresa al link de descarga y se descarga el archivo generado (Figura 16).

Figura 16.

Descarga de datos

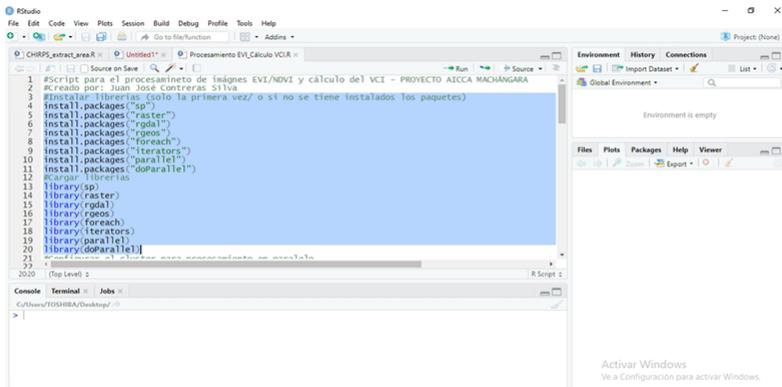


2. Ajustar el script y ejecutar el código en R.

a. Instalar los paquetes a ser utilizados en R (líneas 4-11) y luego cargarlos en el software (líneas 13-20) tal y como se muestra en la Figura 17.

Figura 17.

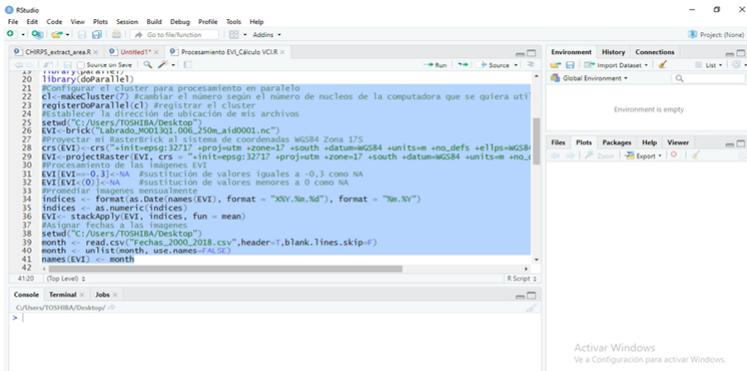
Instalación y carga de paquetes en el software R



b. Especificar el número de núcleos a utilizar, así como indicar la ubicación de los archivos en formato “.nc” descargados en el paso 1 (Figura 18).

Figura 18.

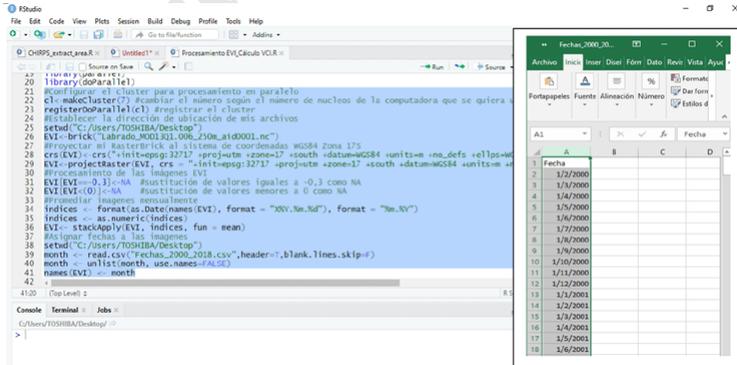
Configuración del número de núcleos a utilizar y la ubicación de los archivos



c. Especificar el directorio de trabajo (línea 38) y cargar los archivos en formato “.nc” con las fechas mensuales del período de las imágenes EVI descargadas (línea 39) como se presenta en la Figura 19.

Figura 19.

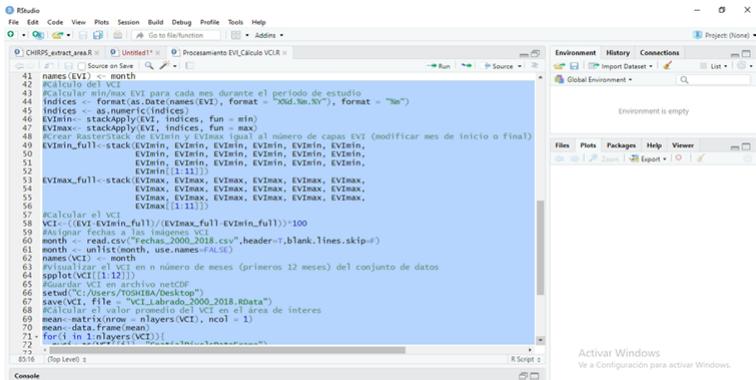
Directorio de trabajo y carga de imágenes satelitales descargadas.



d. Ejecutar las líneas de código hasta el final (línea 83) como se muestra en la Figura 20.

Figura 20.

Ejecución del código



3. Visualizar los resultados espacialmente.

a. Se ejecutan las líneas de código 85 y 86 (Figura 21-22), las cuales visualizan todo el conjunto de datos y seleccionan un subconjunto de la serie. Cabe mencionar que el mismo código puede ser ajustado de acuerdo al periodo de interés.

Figura 21.

Visualización de los datos

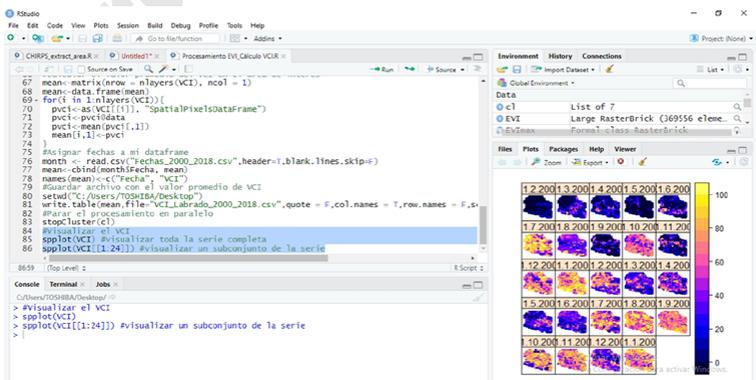
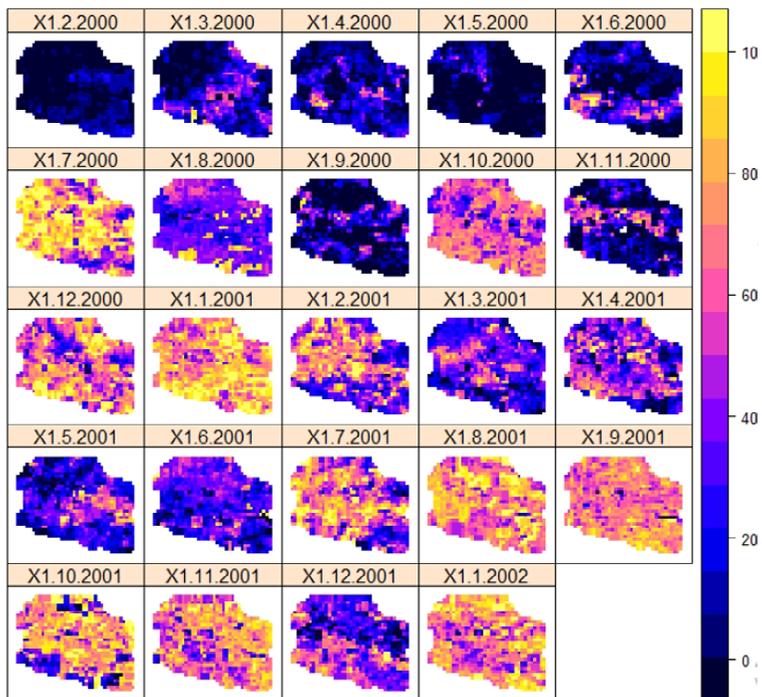


Figura 22.

Visualización de los datos de acuerdo al período de interés

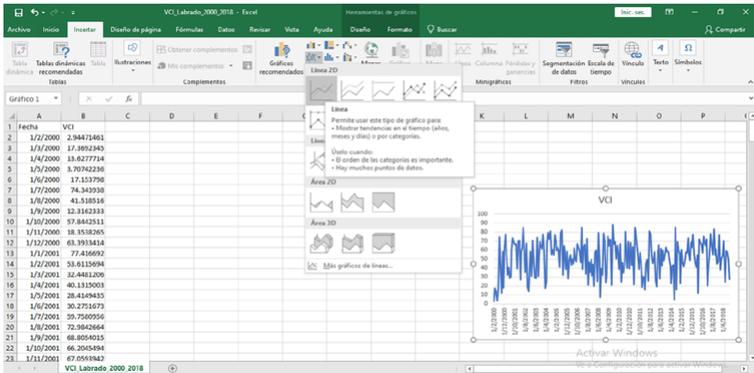


6. Visualizar los resultados temporalmente.

- El archivo en formato “.csv” de salida se puede abrir en Excel y generar un gráfico de serie temporal como se lo indica en la Figura 23.

Figura 23.

Gráfico de serie temporal en Excel del índice VCI



5.5. Cálculo de la relación entre los índices de sequía - vegetación

El procesamiento del método de Coherencia Wavelet se realizó con el software R, utilizando el paquete “WaveletComp”. A continuación, se describe un ejemplo de cálculo de la relación entre SPI y SSI Chanlud, con un nivel de agrupación mensual:

- Los datos de entrada del SPI y SSI se pueden cargar en un solo conjunto de datos, o por separado. En este ejemplo se utilizará únicamente las columnas B y F de la Figura 24.

Figura 24.

Base de datos del SPI-SSI Chanlud.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	Date	SPI1	SPI3	SPI6	SPI12	SSI1	SSI3	SSI6	SSI12
2	1/1/2000	0.11772602				-0.88445285			
3	1/2/2000	1.60612701				0.06923265			
4	1/3/2000	0.421702	1.05150414			0.49914293	0.11198513		
5	1/4/2000	0.800994	1.44243409			0.52866129	0.45690569		
6	1/5/2000	1.5159914	1.51104964			-0.41928764	0.22120786		
7	1/6/2000	-0.53110099	1.09805565	1.38684896		-0.99496288	-0.42915205	-0.08685511	
8	1/7/2000	-0.85084947	0.34247177	1.05955034		-0.78561689	-0.99817666	-0.40887344	
9	1/8/2000	-0.58147123	-1.32817263	0.48505159		-0.65692106	-1.03254834	-0.74936536	
10	1/9/2000	2.13299203	0.30611476	0.89250197		1.45469085	-0.32560248	-0.67297778	
11	1/10/2000	-1.61212948	0.11786141	0.27483436		0.00692381	0.13347229	-0.55761497	
12	1/11/2000	-2.48410234	-1.1466327	-1.54573668		-1.36713708	0.07941416	-0.56340621	
13	1/12/2000	-1.66424933	-3.20464263	-2.09734445	0.21854179	-1.1774416	-1.25847032	-0.66745992	-0.59166824
14	1/1/2001	0.94972282	-1.23135496	-0.92835768	0.40373981	-0.22447965	-1.01508837	-0.36377707	-0.54162688
15	1/2/2001	-0.746338	-0.46614928	-0.92023633	-0.14050865	-1.02522623	-0.96405736	-1.19125071	-0.69725868
16	1/3/2001	-0.30983475	-0.04714985	-1.68268034	-0.25617269	-0.01008131	-0.48729233	-0.92505404	-0.72659979
17	1/4/2001	-0.85417258	-1.05122351	-1.29947387	-0.5698425	-0.59636156	-0.60645997	-0.70394455	-0.90643231
18	1/5/2001	-0.99825748	-1.26071165	-1.09469708	-1.42190097	-1.2383183	-0.90875393	-0.96879848	-1.1208608
19	1/6/2001	0.05001771	-1.03596934	-0.76053651	-1.41120566	0.07434764	-0.97903429	-0.96022191	-1.02109197
20	1/7/2001	-0.65979509	-1.04110713	-1.32963197	-1.43267516	-0.87071039	-0.90938828	-0.95360123	-1.10623353
21	1/8/2001	0.98094449	-0.17129678	-0.9854965	-1.22035137	0.33536961	-0.31449685	-0.83432022	-0.90521532

2. Se debe modificar la dirección de la base de datos en `setwd` y en `monthly.ticks`, modificar el periodo de análisis, en este ejemplo se evalúa el período 2000-2018 (Figura 25).
3. En `my.data` se modifica las variables independiente x y la dependiente y , siendo en este caso $x = \text{SPI } 1$ y $y = \text{SSI } 1$, pertenecientes a CHANLUD.
4. Ejecutando `my.wc2`, se obtiene una matriz de coeficientes que son los resultados del análisis de coherencia wavelet.
5. Para interpretar los resultados, se grafican mediante `wc.image`, obteniendo lo mostrado en la Figura 26.

Figura 25.

Script de Coherencia Wavelet. Pasos del 2 al 5.

```
1 #CÁLCULO DE COHERENCIA WAVELET. Ejemplo: Índices climáticos&SPII#
2 install.packages("waveletcomp")
3 library(waveletcomp)
4 setwd("C:/ale/PROYECTO AICCA/DAT CSV/")#Introducir dirección de carpeta de datos
5 data<-read.csv("SPI-SSI CHANLUD.csv",header=TRUE,sep=",")#base de datos
6 #de los índices climáticos y valores SPII)
7
8 #####
9 monthly.ticks <- seq(as.POSIXct("2000-01-01 00:00:00", format = "%F %T"),
10 as.POSIXct("2018-12-01 00:00:00", format = "%F %T"),
11 by = "month") #Introducir el período de análisis
12
13 my.data <- data.frame(date=monthly.ticks, x =SPII, y = SSII)#Introducir las
14 #variables a analizar
15
16 my.wc2 <- analyze.coherency(my.data, my.pair = c("X","Y"),
17 loess.span = 0, dt = 1/12, dj = 1/250,
18 make.pval = TRUE, n.sim = 500)
19
20 #Para la descripción a detalle de los parámetros:
21 #https://pdfs.semanticscholar.org/3825/de34e8ae27624eece03abf6fbb8f07c795a.pdf
22
23 #Graficar coherencia wavelet
24 wc.image(my.wc2, which.image = "wc", color.key = "4", n.levels = 250,
25 siglvl.contour = 0.05,col.contour = "black", siglvl.arrow = 0.05,
26 legend.params = list(lab = "Niveles de coherencia wavelet ",
27 time.lab = "",period.lab = "Período (años)",
28 main = "WC SPI & SSI 1 CHANLUD", label.time.axis = TRUE,show.date = TRUE, date.format = "%F %T")
29
30 ## Gráfico de coherencia no estacionaria por períodos:
31
```

2. Modificar dirección y Período de análisis

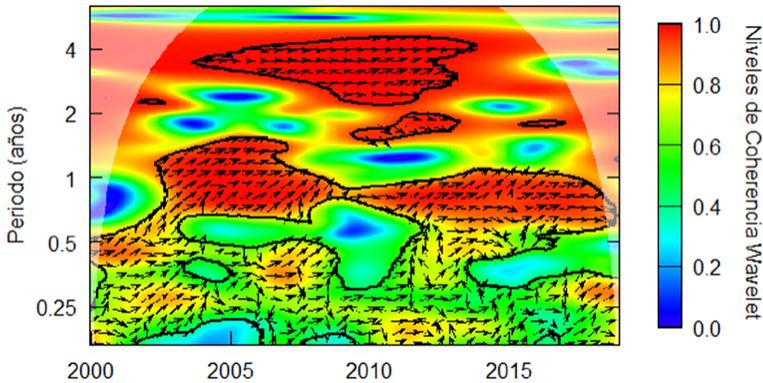
3. Seleccionar las variables x y y

4. Al Ejecutar, se obtiene los resultados de coherencia

5. Graficar los resultados

Figura 26.

Resultados de coherencia entre SPI y SSI Chanlud



La Figura 26 grafica la matriz obtenida con los coeficientes de coherencia cuadrática que representan la correlación entre las dos series analizadas, donde:

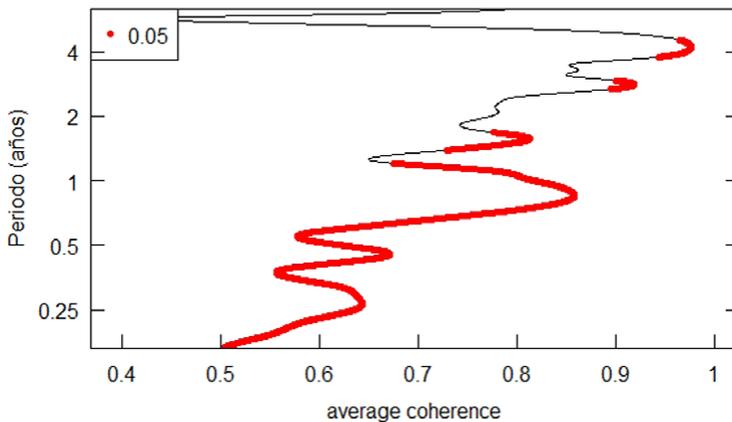
- Período: es equivalente a la escala de tiempo y al inverso de la frecuencia en la que se encuentran las series SPI y SSI.

- Niveles de coherencia wavelet: corresponde a los coeficientes de coherencia cuadrática, es decir, el coeficiente de correlación absoluto, dónde mientras más cercano sea a 1 mayor correlación denota.
- Líneas de contorno en color negro: delimitan las áreas dónde el nivel de confianza de la correlación es igual al 95 %.
- Cono de influencia: es el área con sombreado blanco, que delimita la posibilidad de errores al inicio y final de las series.
- Vectores: indican la fase entre las series, siendo una correlación positiva cuando los vectores tienen sentido hacia la derecha (en fase), y negativa cuando el sentido de los vectores es hacia la izquierda (antifase).

6. Para identificar el periodo con mejor nivel de coherencia promedio a un nivel de significación del 5 %, se utiliza la coherencia promedio que nos da como resultado la Figura 27. Este procedimiento se puede realizar también visualmente con los resultados del paso 5.

Figura 27.

Coherencia wavelet promedio por periodo entre SPI, SSI Chanlud.

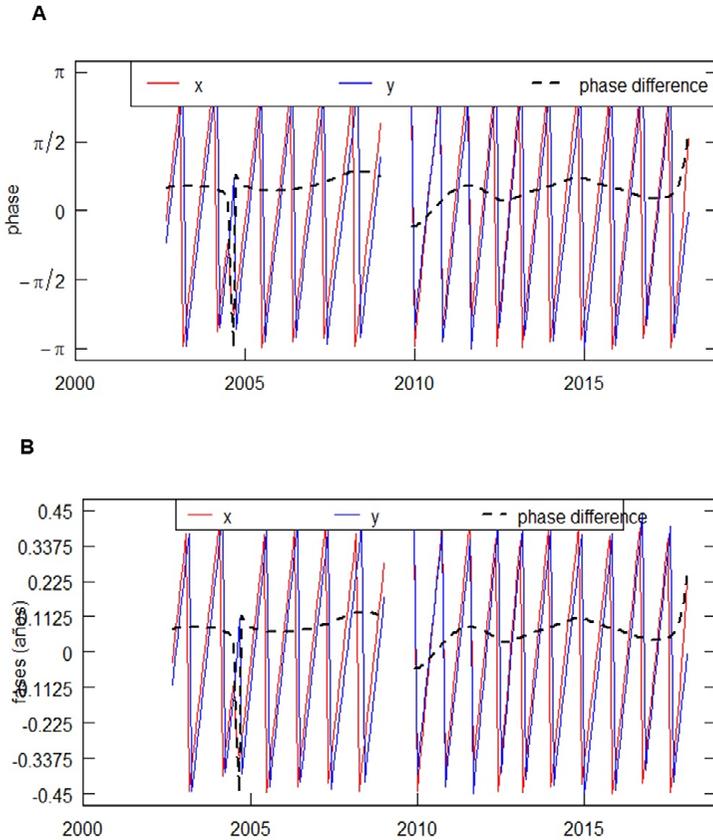


7. Para identificar el ángulo de fase más exacto y el tiempo de desfase con respecto a un periodo en específico se utiliza la selección de fases de la

wavelet. En la Figura 28 se ilustra a modo de ejemplo, los resultados para el periodo de 11 meses (0.9 años).

Figura 28.

Identificación del ángulo de fase (A) y tiempo de desfase (B) del periodo correspondiente a 11 meses (0.9 años).



Interpretación de los resultados

Con todos los elementos analizados anteriormente se concluye los siguientes resultados de la coherencia entre el SPI y SSI para Chanlud:

- Existe una notable correlación entre el SPI y SSI en escalas de tiempo cortas (periodo de 0 a 1.5 años) y a escalas largas (periodo de 3-4 años).
- El sentido de los vectores es hacia la derecha, lo que significa que la correlación es positiva (SPI y SSI en fase).
- Los periodos con mayor nivel de coherencia promedio son 0.9, 3 y 4 años.
- El ángulo de fase en las áreas correlacionadas, muestra que SPI lidera la correlación sobre SSI.
- El tiempo de retraso del SSI con respecto a SPI, en el periodo de 11 meses, está entre 0 y 1.5 meses.
- El tiempo de retraso del SSI con respecto al SPI, en el periodo de 4 años, es inferior a un mes.

En general, los resultados muestran asociaciones el SPI-SSI en periodos cortos y largos, se conoce que la respuesta de la sequía hidrológica a la meteorológica está determinada por la circulación atmosférica y las superficies subyacentes locales (incluido el tipo de suelo, la cubierta vegetal y el tipo de topografía), en escalas de tiempo largas y cortas respectivamente (Medved-Cvikl, Ceglary kajfe, 2012; Huang et al., 2017).

Nota: de la misma manera que se ha evaluado en este ejemplo la relación entre el SPI-SSI, se evalúa las asociaciones entre estos índices de sequía con el índice de condición de la vegetación (VCI).

5.6. Identificación de las épocas húmedas y secas

El estado de la vegetación influye en la provisión de servicios ecosistémicos esenciales como el abastecimiento de agua y generación de energía eléctrica (Rojas y Melchor, 2016), siendo necesario monitorear su condición y evaluar cómo influencia o se ve influenciada por las variables climáticas locales como a escala sinóptica, en épocas húmedas y secas. Como se abordó en apartados anteriores, la vegetación se puede caracterizar mediante índices que representan un valor generado tras el procesamiento de información satelital contenida en una imagen multibanda, dicho valor es sensible a la cobertura vegetal, por lo tanto, a través de los mismos se puede evaluar y

monitorear el estado de la vegetación de un área determinada (Liu y Kogan, 1996). Se han desarrollado varios índices, sin embargo, se ha escogido el Índice de Condición de la Vegetación (VCI), mismo que se caracteriza por tener una mayor capacidad de reflexión de la sequía en muchas partes del mundo (Lin et al., 2017). Además, puede estimar el estado de la vegetación de acuerdo con el mejor y el peor vigor durante un período particular en diferentes años, es decir, sirve para identificar el estrés de la vegetación relacionado con la sequía y medir la intensidad, el tiempo de inicio, la duración, la dinámica y los impactos de la sequía en la condición general de la vegetación (Dutta et al., 2015).

Las variables de temperatura y precipitación, son las más comúnmente obtenidas por a estaciones de monitoreo; no obstante, existen también productos de reanálisis que son usados para monitorear las condiciones atmosféricas locales, y tienen las ventajas de estar disponibles casi en tiempo real (Shah y Mishra, 2014) y cubrir áreas de estudio más extensas. Por otra parte, los Índices climáticos a escala sinóptica permiten caracterizar los patrones climáticos globales, que por su estructura pueden influir en el tiempo y clima de una zona (Forchhammer y Post, 2004). De hecho, se ha identificado que las variaciones en la temperatura del mar y la atmósfera en los océanos Pacífico y Atlántico, las corrientes del Caribe y la humedad proveniente de la Amazonía influyen el clima en nuestra región (Camposano et al., 2016, 2018; Esquivel-Hernández et al., 2019; Mendoza et al., 2019; Mora y Willems, 2012; Tobar y Wyseure, 2018; Vuille et al., 2000).

En las siguientes secciones se muestran los procedimientos y métodos utilizados para evaluar las relaciones entre el VCI y variables climáticas a escala local y sinóptica. Los resultados obtenidos pueden servir para mejorar la gestión de los recursos hídricos, planificación de riego y seguridad alimentaria.

Una vez que se dispone del cálculo de los índices SPI, SSI y VCI, en la Tabla 5 se detallan los datos de entrada necesarios para ejecutar las respectivas relaciones entre el Índice de condición de la vegetación, con las variables climáticas y de reanálisis.

Tabla 5.

Datos de entrada requeridos para realizar las relaciones entre VCI y las diferentes variables climáticas

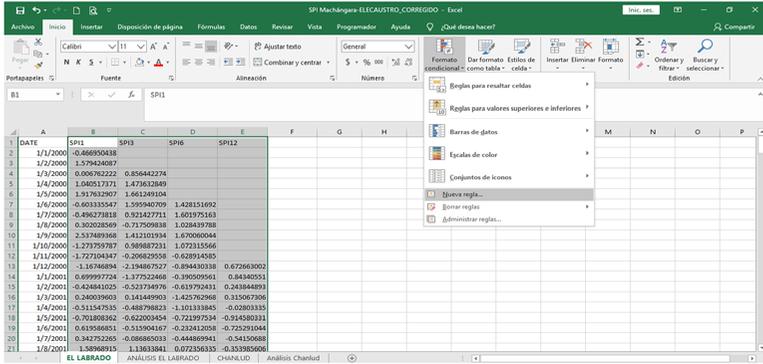
No.	Datos de entrada	Formato	Estructura de la base de datos
1	Índice de Precipitación Estandarizado (SPh)	.csv (delimitado por comas)	Columna 1: Fecha Columna 2: Precipitación mensual
2	Índice de Caudal Estandarizado (SSH)	.csv (delimitado por comas)	Columna 1: Fecha Columna 2: Caudal mensual
3	Índice de Condición de la Vegetación (VCI)	.csv (delimitado por comas)	Columna 1: Fecha Columna 2: VCI mensual
4	Índices climáticos	.csv (delimitado por comas)	Columna 1: Fecha Columna 2: Índice climático Columna n: Índice climático
5	Variabes de reanálisis	.csv (delimitado por comas)	Columna 1: Fecha Columna 2: Variable reanálisis Columna n: Variable reanálisis

A partir de los índices calculados anteriormente se identificaron los eventos secos y húmedos, como ejemplo se muestra para El Labrado.

1. Seleccionar el conjunto de datos que contiene el SPI 1, 3, 6 y 9 y en la pestaña Inicio, seleccionar Nueva regla..., como se muestra en la Figura 29.

Figura 29.

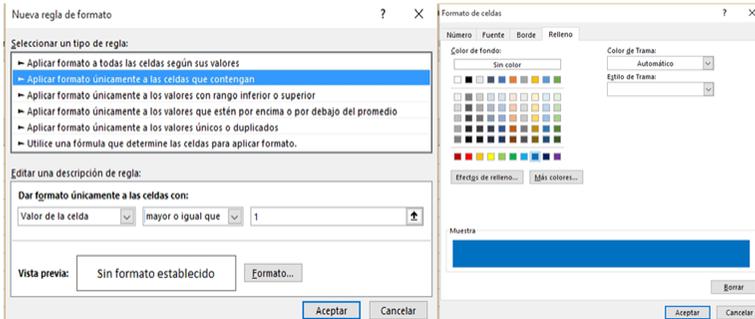
Paso 1: Inicio, Formato condicional, Nueva Regla



2. En Nueva Regla, seleccionar la opción Aplicar formato únicamente a las celdas que contengan, luego editar la descripción de la regla de manera que se dé formato únicamente a las celdas con: Valor de la celda > mayor o igual que → 1, lo cual corresponde al umbral para la determinación de eventos húmedos. Posteriormente, definimos el Formato que se le va a aplicar a las celdas que cumplan con la condición. En este caso, en la pestaña Relleno escogemos un color de preferencia y Aceptar (Figura 30).

Figura 30.

Utilización de Formato condicional para rellenar las celdas con valores igual y/o superiores a 1 (eventos húmedos)



3. Repetimos el Paso 2, cambiando únicamente la descripción de la regla por: Valor de la celda→menor o igual que→1, lo cual corresponde al umbral para la determinación de eventos secos. Y cambiar el color del Relleno. El resultado obtenido se observa en la Figura 31.

Figura 31.

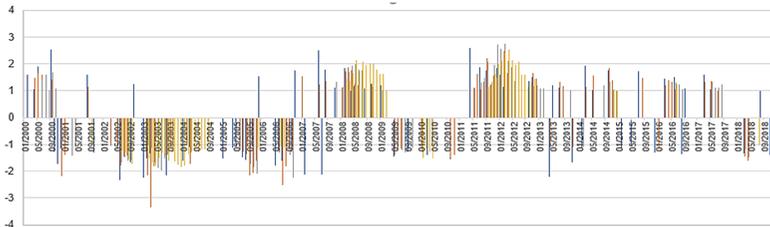
Resultado obtenido de Formato Condicional. En azul: eventos húmedos. En rojo: eventos secos.

	A	B	C	D	E
1	DATE	SPI1	SPI3	SPI6	SPI12
2	1/1/2000	-0.46695044			
3	1/2/2000	1.57942409			
4	1/3/2000	0.00676222	0.85644227		
5	1/4/2000	1.04051737	1.47363285		
6	1/5/2000	1.91763291	1.6612491		
7	1/6/2000	-0.60333555	1.59594071	1.42815169	
8	1/7/2000	-0.49627382	0.92142771	1.60197516	
9	1/8/2000	0.30202857	-0.71750984	1.02843979	
10	1/9/2000	2.53748937	1.41210193	1.67006004	
11	1/10/2000	-1.27375979	0.98988723	1.07231557	
12	1/11/2000	-1.72710435	-0.20682956	-0.62891459	
13	1/12/2000	-1.16746894	-2.19486753	-0.89443034	0.672663
14	1/1/2001	0.69999772	-1.37752247	-0.39050956	0.84340551
15	1/2/2001	-0.42484103	-0.52373498	-0.61979243	0.24384489
16	1/3/2001	0.2400396	0.1414499	-1.42576297	0.31506731
17	1/4/2001	-0.51154753	-0.48879882	-1.10133385	-0.02803335
18	1/5/2001	-0.70180836	-0.62200345	-0.72199753	-0.91458033
19	1/6/2001	0.61958685	-0.51590417	-0.23241206	-0.72529104
20	1/7/2001	0.34275226	-0.08686503	-0.44486994	-0.54150688
21	1/8/2001	1.58968915	1.13633841	0.07235633	-0.35398561
22	1/9/2001	-0.19517299	0.61449771	-0.05128829	-1.02118933
23	1/10/2001	-1.29831571	-0.44495557	-0.29026247	-0.91067603
24	1/11/2001	0.66511983	-0.41842417	0.34718419	-0.34431962
25	1/12/2001	0.37928015	-0.04083872	0.26488216	-0.06296408
26	1/1/2002	-0.84923869	-0.0766568	-0.35297356	-0.51826232
27	1/2/2002	-0.1114799	-0.47753699	-0.71856939	-0.38707869
28	1/3/2002	-0.46314933	-1.03848369	-0.82075211	-0.53730223

- Los resultados se pueden graficar para una mejor visualización, obteniéndose los resultados mostrados en la Figura 32.

Figura 32.

Eventos secos y húmedos según el SPI a diferentes escalas en El Labrado.



Interpretación de resultados

En general se observó que, alrededor del 2002 hasta el 2006, predominaron eventos secos sobre los eventos húmedos, posteriormente desde 2007 a inicios del 2008, y desde mayo del 2011 hasta mediados del 2017, predominaron los eventos húmedos sobre los secos.

5.7 Evaluación de la relación entre las variables temperatura y precipitación con el índice de condición de la vegetación (VCI)

En esta sección se realizan las correlaciones entre las variables temperatura y precipitación con el VCI, y se analiza la interacción entre estas variables en la épocas secas y húmedas determinadas en la sección 5.6. El método utilizado para evaluar las relaciones es de Coherencia Wavelet. A continuación, como ejemplo, se analiza la relación entre la Precipitación y el VCI de la subcuenca de El Labrado, mediante el script Wavelet Coherence.

1. Los datos de entrada de Precipitación y VCI, se pueden cargar en un solo conjunto de datos como se observa en la Figura 33.

Figura 33.

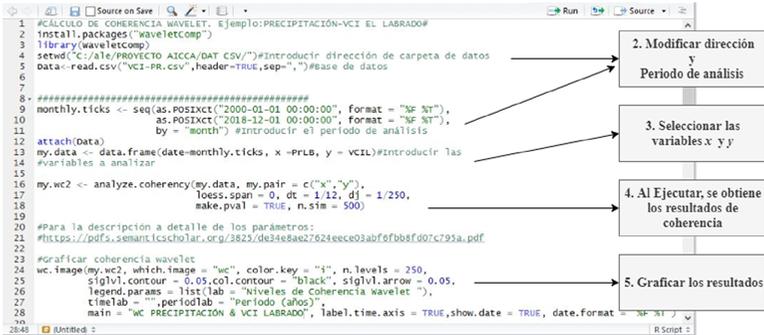
Estructura de los datos de entrada

	A	B	C	D	E	
1	Date	VCIL	VCICH	PrLB	PrCH	
4	1/3/2000	16.6347364	14.7640933	143.5	163.6	
5	1/4/2000	12.6984391	21.1995921	189.9	185.8	
6	1/5/2000	3.04489414	2.27426115	243.3	259.45	
7	1/6/2000	16.6956098	16.9134266	96.35	123.25	
8	1/7/2000	78.9075331	84.2016248	67.8	76.8	
9	1/8/2000	38.5912439	36.5707142	68.75	67.35	
10	1/9/2000	10.9393902	15.476759	165.14	158.19	
11	1/10/2000	59.9456563	63.6765502	52.2	44.59	
12	1/11/2000	17.2960903	20.1663526	33.5	30.5	
13	1/12/2000	65.9301154	60.6354102	64.31	54.15	
14	1/1/2001	80.4314566	75.7764046	138.91	148.05	
15	1/2/2001	54.8082066	58.0139011	87	73.2	
16	1/3/2001	34.2707255	40.6286548	155.35	132.9	
17	1/4/2001	41.8462336	37.66783	122.79	118.8	
18	1/5/2001	30.4684798	37.6561704	100.3	99.6	
19	1/6/2001	30.166022	34.0489425	133.47	147.9	
20	1/7/2001	63.421176	71.549236	95.7	84.6	
21	1/8/2001	76.2519215	79.2820147	96.3	108.3	
22	1/9/2001	72.2648193	77.1032076	60.7	90	
23	1/10/2001	70.6477701	77.0588097	51.55	41.1	
		VCI-PR				

2. Según el script (Figura 34), se debe modificar la dirección de la base de datos en `setwd` y en `monthly.ticks`, modificar el periodo de análisis, en este ejemplo se evaluará desde el 2000 hasta el 2018.

Figura 34.

Script de Coherencia Wavelet, ejemplo Precipitación & VCI 1 El Labrado. Pasos del 2 al 5.



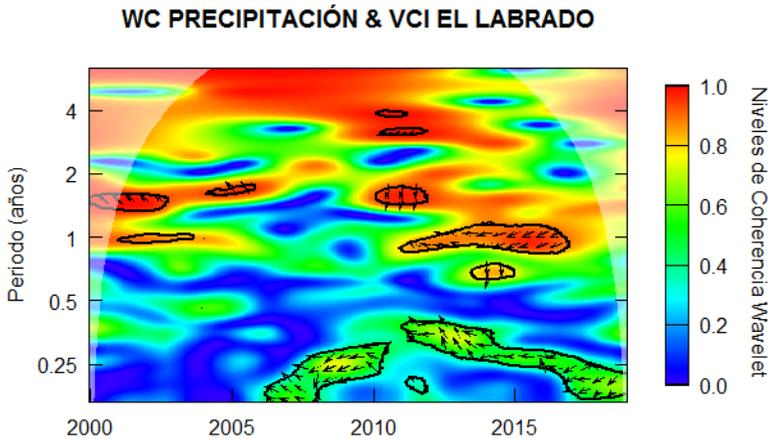
3. En `my.data` se modifica las variables independiente `x` y la dependiente `y`, siendo en este caso `x`= Precipitación y `y`=VCI 1 EL LABRADO.

4. Ejecutando `my.wc2`, se obtiene una matriz de coeficientes que son los resultados del análisis de coherencia wavelet.

5. Para interpretar los resultados, se grafican mediante `wc.image`, obteniendo lo mostrado en la Figura 35.

Figura 35.

Resultado obtenido de la relación entre Precipitación y VCI El Labrador



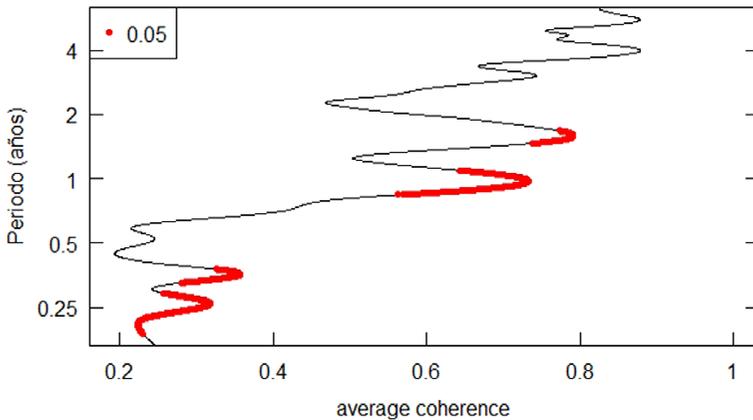
La Figura 35 grafica la matriz obtenida con los coeficientes de coherencia cuadrática que representan la correlación entre las dos series analizadas, donde:

- **Periodo:** es equivalente a la escala de tiempo y al inverso de la Frecuencia en la que se encuentran las series Precipitación y VCI.
- **Niveles de coherencia wavelet:** corresponde a los coeficientes de coherencia cuadrática, es decir, el coeficiente de correlación absoluto, dónde mientras más cercano sea a 1 mayor correlación denota.
- **Contorno grueso en color negro:** delimitan las áreas dónde el nivel de confianza de la correlación es igual al 95 %.
- **Cono de influencia:** es el área con sombreado blanco, que delimita la posibilidad de errores al inicio y final de las series.
- **Vectores:** indican la fase entre las series, siendo una correlación positiva cuando los vectores tienen sentido hacia la derecha (en fase), y negativa cuando el sentido de los vectores es hacia la izquierda (antifase).

6. Para identificar el periodo con mejor nivel de coherencia promedio a un nivel de significación del 5 %, se emplea la coherencia promedio que nos da como resultado la Figura 36. Este procedimiento se puede realizar también visualmente en los resultados graficados en el paso 5.

Figura 36.

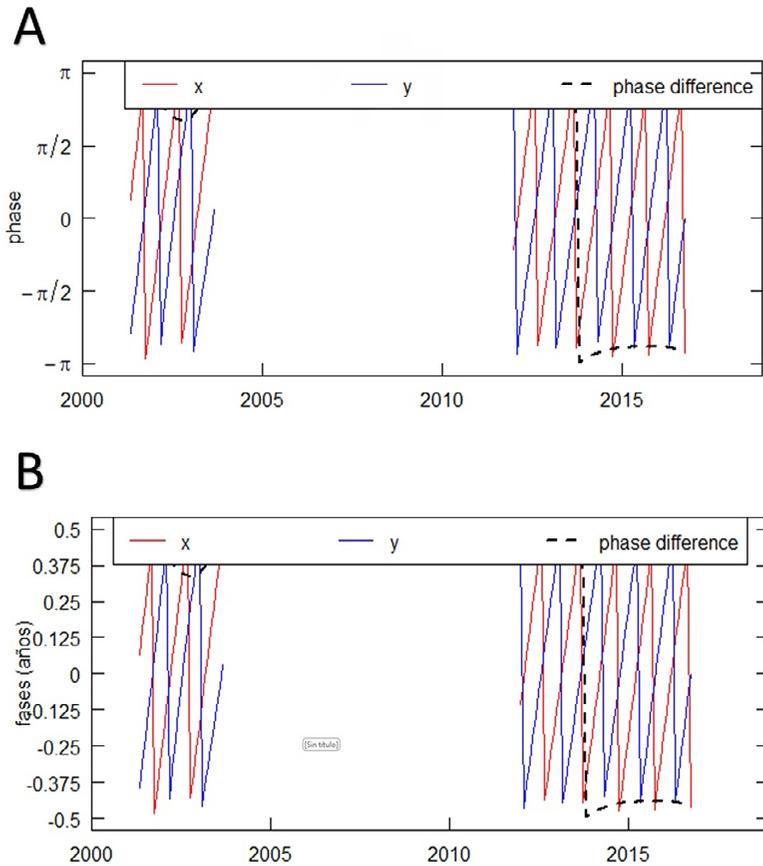
Coherencia wavelet promedio por periodo entre Precipitación y VCI.



7. Para identificar el ángulo de fase más exacto que visualmente mediante los vectores y el tiempo de desfase con respecto a un periodo en específico se utiliza la selección de fases de la wavelet. En la Figura 37 se ilustra, como ejemplo, los resultados para el periodo de 1 año.

Figura 37.

Identificación del ángulo de fase (A) y tiempo de desfase (B) del periodo correspondiente a 1 año.



Interpretación de los resultados

Con todos los elementos analizados anteriormente se concluye los siguientes resultados de la coherencia entre el TNI y SPI 1 para Chanlud.

- Existe una correlación negativa entre las variables en periodos entre 0-0.4 años y entre 0.9 y 2 años, siendo estas últimas más fuertes (>0.8).
- El periodo con mayor nivel de coherencia promedio es 1 año.
- Como se indicó en la sección 5.6, durante el periodo entre 2011 y 2017 existe una predominancia de eventos húmedos sobre secos. En las correlaciones realizadas se observa que, en este lapso de tiempo, existe una relación de antifase (correlación negativa) entre la precipitación y el índice de condición de la vegetación alrededor del periodo de 1 año.
- El ángulo de fase el área correlacionada entre 2014-2016 para el periodo de 1 año, está entre $-\pi/2$ y $-\pi$, lo que implica que la precipitación lidera los efectos del VCI. El tiempo de reacción del VCI es menor a 2 meses.
- En general, los resultados muestran que la vegetación reacciona principalmente a eventos húmedos más que a eventos secos.

Nota: de la misma manera como se evaluó la relación con la Precipitación, se realizó el proceso con la variable de Temperatura para El Labrado.

5.8 Evaluación de la relación entre el índice de condición de la vegetación (VCI) con los índices climáticos a escala sinóptica

Como ejemplo, evaluaremos la relación del VCI Chanlud con todos los índices climáticos, posteriormente se seleccionará los mejores resultados para realizar el análisis de fases. A continuación, se muestra paso a paso el ejemplo, donde se evalúa la correlación, mediante el Script “Coherencia Wavelet automatizado”. Los datos de entrada del VCI e índices climáticos se pueden cargar en un solo conjunto de datos (Figura 38) o por separado.

Figura 38.

Estructura de los datos de entrada

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	Date	VCICH	VCILB	BEST	NAO	NIÑO 12	NIÑO 3	NIÑO 3.4	PDO	SOI	TNA	TSA	TNI	CAR
2	1/3/2000	14.7640933	16.6347364	-1.2	0.4	26.02	26.7	26.3	0.29	2.2	0.06	0.4	1.857	-0.15
3	1/4/2000	21.1995921	12.6984391	-1.01	-0.18	25.5	27.41	26.95	0.35	2	-0.01	0.37	1.494	-0.04
4	1/5/2000	2.27426115	3.04489414	-0.58	1.52	24.02	26.88	27.07	-0.05	0.6	-0.06	0.29	0.783	-0.05
5	1/6/2000	16.9134266	16.6956098	-0.27	0.28	22.75	26.03	26.94	-0.44	-0.3	-0.16	0.2	0.17	-0.04
6	1/7/2000	84.2016248	78.9075331	-0.07	-1	21.68	25.18	26.63	-0.66	-0.3	0.01	0.15	-0.465	-0.07
7	1/8/2000	36.5707142	38.5912439	-0.44	-0.5	20.44	24.64	26.37	-1.19	1.2	0.15	0.2	-0.707	-0.04
8	1/9/2000	15.476759	10.9393902	-0.72	-0.06	20.5	24.59	26.2	-1.24	1.4	0.02	0.02	-0.798	-0.01
9	1/10/2000	63.6765502	59.9456563	-0.9	1.51	20.74	24.48	26.02	-1.3	1.8	0	0.1	-0.377	0
10	1/11/2000	20.1663526	17.2960903	-1.4	-1.1	20.46	24.4	25.92	-0.53	3	-0.12	0.07	-0.097	0.02
11	1/12/2000	60.6354102	65.9301154	-0.78	-0.63	21.85	24.57	25.68	0.52	1.3	-0.19	-0.01	0.362	-0.01
12	1/1/2001	75.7764046	80.4314566	-0.87	-0.22	23.94	25.24	25.81	0.6	1.6	-0.13	0.16	0.785	0
13	1/2/2001	58.0139011	54.8082066	-1.15	0.07	25.62	26.12	26.12	0.29	2.8	-0.15	0.17	1.25	0
14	1/3/2001	40.6286548	34.2707255	-0.46	-1.73	26.66	27.2	26.8	0.45	1.5	0.15	0.29	0.853	0.03
15	1/4/2001	37.66783	41.8462336	-0.09	-0.15	25.72	27.46	27.33	-0.31	0.3	0.05	0.38	0.239	0.03
16	1/5/2001	37.6561704	30.4684798	0.36	0.03	23.71	27.11	27.6	-0.3	-0.8	0.06	0.47	-0.568	0.02
17	1/6/2001	34.0489425	30.166022	0.13	0.11	22.28	26.34	27.54	-0.47	0.5	0.24	0.36	-1.504	0.06
18	1/7/2001	71.549236	63.421176	0.44	-0.22	21.38	25.53	27.25	-1.31	-0.3	0.3	0.15	-2.452	0.09
19	1/8/2001	79.2820147	76.2519215	0.51	-0.22	20.16	24.9	26.8	-0.77	-0.7	0.34	0.14	-2.846	0.14
20	1/9/2001	77.1032076	72.2648193	-0.08	-0.49	19.6	24.31	26.52	-1.37	0.3	0.51	0.11	-2.858	0.11
21	1/10/2001	77.0588097	70.6477701	0.14	0.25	19.88	24.55	26.57	-1.37	-0.1	0.48	0.2	-2.637	0.1

1. Según el siguiente script (Figura 39) se debe modificar la dirección de la base de datos.

Figura 39.

Script de Coherencia Wavelet, ejemplo Índices climáticos & VCI 1 CHANLUD. Pasos del 1 al 4.

```

1 #install.packages("waveletComp")
2 library(waveletComp)
3 setwd("C:/ale/PROYECTO AICCA/DAT CSV/")
4 Data<-read.csv("INDEX-VCI.CSV", header=TRUE, sep=",")
5 #####
6 attach(Data)
7 monthly.ticks <- seq(as.POSIXct("2000-01-01 00:00:00", format = "%F %T"),
8                      as.POSIXct("2017-12-01 00:00:00", format = "%F %T"),
9                      by = "month");}
10
11 columna<-names(Data)
12
13 for(i in 4:14){
14   tiff(paste("Índice climático",columna[i], "&", columna[2], ".tiff"), width=6, height=4, units="in", res=
15   mydata<-data.frame(date=monthly.ticks,x=Data[,columna[i]],y=Data[,columna[2]]);
16   my.wc2 <- analyze.coherency(mydata,my.pair = c("x","y"));
17   loess.span = 0, dt = 1/12, dj = 1/250,
18   #lowerPeriod=0.5,
19   #upperPeriod = 3,
20   make.pval = TRUE, n.sim = 100);
21
22   wc.image(my.wc2, which.image = "wc", color.key = "f", n.levels = 250,
23   siglvl.contour = 0.05,col.contour = "black", siglvl.arrow = 0.09,
24   legend.params = list(tab = "wavelet coherence Level"),
25   timeLab = "", periodlab = "Period (years)",
26   main = paste("Índice climático",columna[i], "&", columna[2]),
27   # time axis:
28   label.time.axis = TRUE, show.date = TRUE,
29   spec.time.axis = list(at = paste(2000:2017, "-01-01", sep = ""),
30   labels = 2000:2017));
31
32   dev.off()
33 }
34
35
36

```

1. Cargar base de datos que incluya la variables x y y

2. Modificar el periodo de análisis

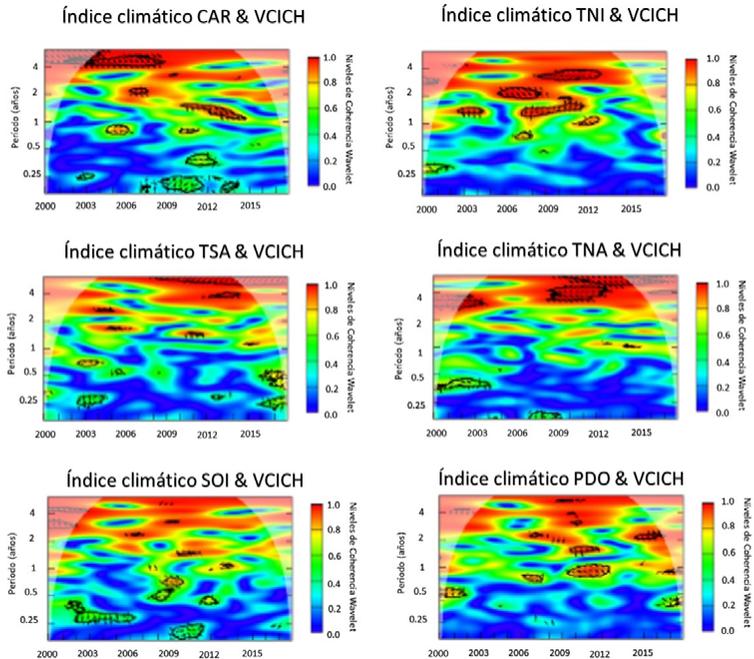
3. Delimitar el rango que contiene las columnas con todas las posibles variables x y la variable y

4. Modificar por la columna que contenga los valores de y

2. En este ejemplo se evaluará los índices desde el 2000 hasta el 2017. Asimismo, se debe indicar las columnas con los índices climáticos (variables x), la variable VCI y los títulos de los gráficos (Figura 40).

Figura 40.

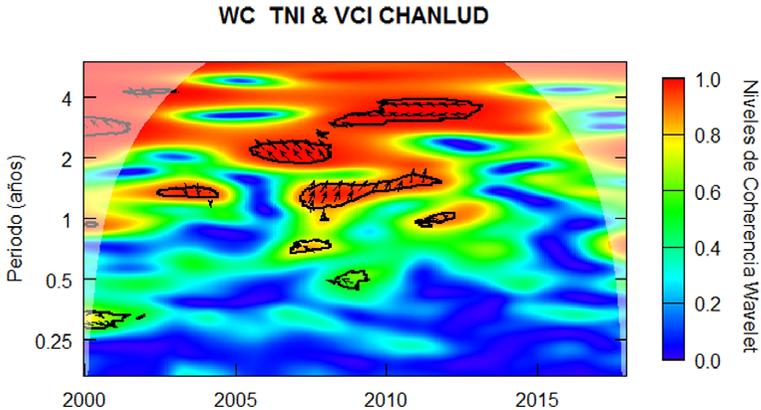
Resultados obtenidos de las relaciones entre los índices climático y el VCI Chanlud.



2. A partir de los resultados obtenidos, como ejemplo se analizará la fase entre el VCI y TNI, determinando la wavelet correspondiente a la relación entre las variables (Figura 41).

Figura 41.

Resultado obtenido de la relación entre TNI y VCI Chanlud.



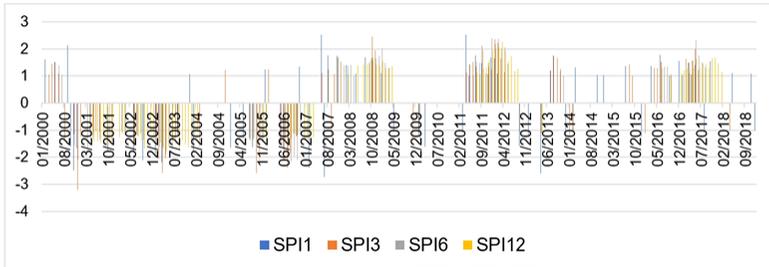
La Figura 41 muestra la matriz obtenida con los coeficientes de coherencia cuadrática que representan la correlación entre las dos series analizadas, donde:

- Periodo: es equivalente a la escala de tiempo y al inverso de la Frecuencia en la que se encuentran las series TNI y VCI.
- Niveles de coherencia wavelet: corresponde a los coeficientes de coherencia cuadrática, es decir, el coeficiente de correlación absoluto, dónde mientras más cercano sea a 1 mayor correlación denota.
- Contorno grueso en color negro: delimitan las áreas dónde el nivel de confianza de la correlación es igual al 95 %.
- Cono de influencia: es el área con sombreado blanco, que delimita la posibilidad de errores al inicio y final de las series.
- Vectores: indican la fase entre las series, siendo una correlación positiva cuando los vectores tienen sentido hacia la derecha (en fase), y negativa cuando el sentido de los vectores es hacia la izquierda (antifase).

4. En la Figura 41, se identifica que los periodos que muestran mayores áreas de correlación significativa son aproximadamente 1.3, 2 y 3.5 años. A continuación, se identifica el ángulo de fase para las relaciones encontradas y se determina si ocurrieron en épocas secas o húmedas identificadas previamente (Figura 42).

Figura 42.

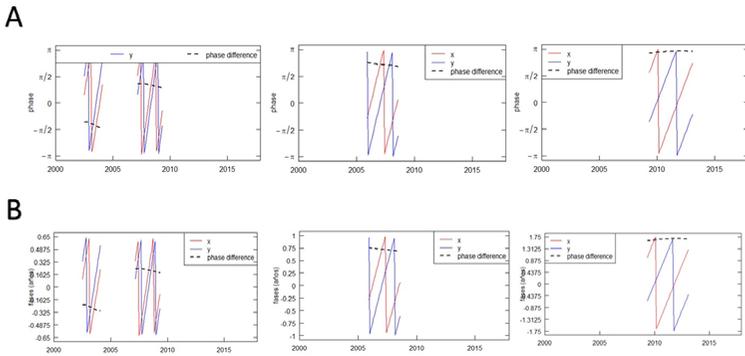
Eventos secos y húmedos según el SPI a diferentes escalas en Chanlud



5. Se realiza la selección de fases para determinar el tiempo de desfase con respecto a un periodo en específico. En la Figura 43 se ilustra, como ejemplo, los resultados para el periodo de 1.3 años, 2 años y 3.5 años.

Figura 43.

Identificación del ángulo de fase (A) y tiempo de desfase (B) para el periodo de 1.3, 2 y 3.5 años respectivamente



Interpretación de los resultados

Con todos los elementos analizados se concluye lo siguiente sobre la coherencia entre el TNI y VCI 1 para Chanlud:

- Existe una notable correlación entre el TNI y VCI en escalas de tiempo de entre 1 a 4 años.
- El sentido de los vectores a escalas de ~ 1 año es hacia la derecha, lo que significa que la correlación es positiva (TNI y VCI en fase), por el contrario, a escalas superiores a 2 años, la relación es negativa.
- Relación en el periodo de 1.3 años entre el 2007-2008, TNI adelantado del VCI con aproximadamente 3 meses.
- Relación en el periodo de 2 años entre 2006-2008, VCI adelantado del TNI con ~ 3 meses.
- Relación en el periodo de 3.5 años entre 2010-2013, VCI adelantado del TNI con ~ 1 mes.

En general, los resultados muestran asociaciones el TNI-VCI durante los años 2006-2008 y 2010-2013, en este lapso de tiempo, hubo predominancia de eventos húmedos, lo que sugiere que la condición de la vegetación se asocia con el TNI, principalmente en épocas húmedas según indica el SPI.

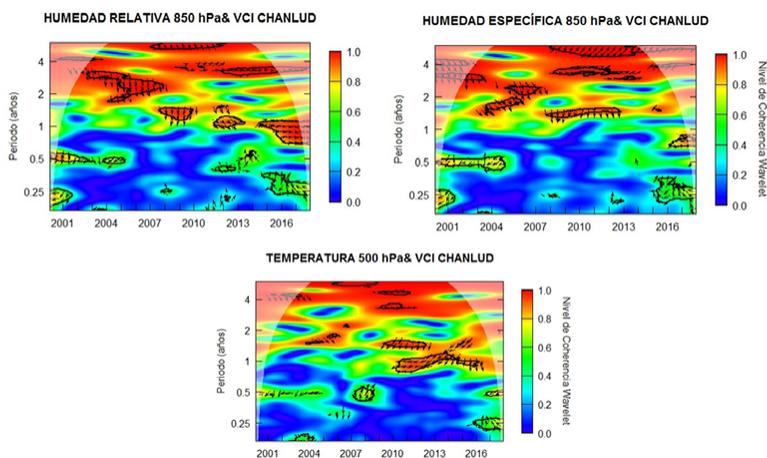
Nota: de la misma manera como se evaluó la relación con el índice climático TNI, se puede analizar a detalle los otros índices climáticos seleccionados en la sección 3.2.

5.9 Evaluación de la relación entre el índice de condición de la vegetación (VCI) con las variables atmosféricas a escala local

Los pasos a seguir son los mismos que los ejemplificados con los índices climáticos en el apartado anterior. Debido a que el proceso de cálculo es igual a lo descrito con anterioridad, en este ejemplo (Figura 44) se mostrarán los resultados del procedimiento entre las variables Temperatura, Humedad específica y relativa con el VCI Chanlud.

Figura 44.

Coherencia Wavelet entre las variables de reanálisis Humedad relativa (850 hPa), Humedad específica (850 hPa) y Temperatura (500 hPa) con el VCI Chanlud, a escala mensual.



Interpretación de los resultados

- Con la temperatura a 500 hPa se observó una mejor correlación en el periodo de ~1 año, siendo la relación negativa, entre el 2010-2015, y un retraso del VCI de ~ 3 meses.
- Con la Humedad relativa a 850 hPa, se observó relaciones predominantes en los periodos aproximados 1.4 y 2.5 años, entre 2009-2001 y 2003-2006, respectivamente. Ambas relaciones son positivas, dónde le VCI muestra un adelanto entre 2 y 7 meses.
- Con la Humedad específica a 850 hPa, se observó la mejor correlación positiva alrededor de 2.8 años, entre 200-2004 y un adelanto del VCI de 7 meses.

En general se obtuvo que en los lapsos de tiempo donde hubo correlaciones significativas, los cambios en la condición de la vegetación son los que influyen en la humedad relativa y específica, siendo la correlación positiva, es decir, mientras que en mejor condición se encuentre la vegetación, mayor es el % de humedad. Con la Temperatura se obtuvo principalmente relaciones negativas a periodos inferiores a 1 año, donde el incremento en la temperatura promedio del aire a 500 hPa, causa efectos adversos en la vegetación.

6. Bibliografía:

- Buzai, G., Cacace, G., Humacata, L., y Lanzelotti, S. (2015). *Teoría y métodos de la Geografía Cuantitativa. Libro 1: por una Geografía de lo real.*
- Grinsted, A., Moore, J.C., y Jevrejeva, S. (2004). "Application of the Cross Wavelet Transform and Wavelet Coherence to Geophysical Time Series". *Nonlinear Processes in Geophysics*, 11(5/6), 561-66.
- Huang, S., Li, P., Huang, Q., Leng, G., Hou, B., y Ma, L. (2017). "The Propagation from Meteorological to Hydrological Drought and Its Potential Influence Factors". *Journal of Hydrology*, 547,184-95.
- Kogan, F. (1997). "Global Drought Watch from Space". *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78(4),621-36.
- Leng, G., Qihong T., y Rayburg, S. (2015). "Climate change impacts on meteorological, agricultural and hydrological droughts in China". *Global and Planetary Change*, 126, 23-34.
- Liu, W.T., y Kogan, F. (1996). "Monitoring regional drought using the Vegetation Condition Index". *International Journal of Remote Sensing*, 17(14), 2761-82.
- McKee, T. B., Doesken, N. J., y Kleist, J. (1993). "The relation of drought frequency and duration to time scales". *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*, 17(22),179-83.
- Medved-Cvikl, B., Ceglar, A., y Kajfe, L. (2012). "The Response of Hydrological Droughts to Climatic Droughts at Different Time Scales in Dravinja, Savinja and Krka Basins in Slovenia". *Sustainability* 2019, 11, 1817
- Misiti, M., Misiti, Y., Oppenheim, G. y Poggi, J. (2007). *Wavelets and Their Applications*. London. Newport Beach, CA: ISTE.
- Scholz, F. W., y Stephens, M. A. (1987). "K-Sample Anderson–Darling Tests". *Journal of the American Statistical Association*, 82 (399), 918-24.
- Tallaksen, L. M., y Van Lanen, H. (2004). *Hydrological Drought: Processes and Estimation Methods for Streamflow and Groundwater*.
- Torrence, C., y Gilbert P. Compo. (1998). "A Practical Guide to Wavelet Analysis". *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79 (1), 18.

- Valiente, O. (2001). "Sequía: definiciones, tipologías y métodos de cuantificación". *Investigaciones geográficas*, (26), 59-80.
- Van Loon, A. F., y Laaha, . 2015. "Hydrological drought severity explained by climate and catchment characteristics". *Journal of Hydrology*, 526, 3-14.
- Vicente-Serrano, S., López-Moreno, J., Beguería, S., Lorenzo-Lacruz, J., Azorin-Molina, C. y Morán-Tejeda, E. (2012). "Accurate computation of a streamflow drought index". *Journal of Hydrologic Engineering*, 17 (2), 318–332.

Prueba de lectura



Este libro fue publicado digitalmente en agosto de 2024
y pertenece al sello editorial UCuenca Press.

Cuenca - Ecuador

Reconocida como una de las mayores amenazas naturales, la sequía impacta la vida y provoca considerables pérdidas económicas. La disminución de las precipitaciones regionales, influenciada por los procesos climáticos globales, anuncia un aumento en su frecuencia y gravedad. Ante este fenómeno, es esencial disponer de herramientas precisas para comprender sus mecanismos y mitigar la severidad de sus efectos.

Este libro presenta una guía metodológica integral para el cálculo de los índices de sequía meteorológica e hidrológica, así como un índice para caracterizar el estado de la vegetación. Utiliza el método de Coherencia Wavelet para evaluar sus correlaciones y realiza un análisis de la respuesta temporal histórica de la vegetación frente a diversas variables climáticas y atmosféricas. Esto se pone en práctica a través del caso de la cuenca del río Machángara.

Sus autores, Alex Avilés, Juan José Contreras, Gabriela Nieves y Jheimy Pacheco, ofrecen a la comunidad académica la posibilidad de generar alertas tempranas y contribuir a enfrentar uno de los desafíos más urgentes de nuestro tiempo desde una perspectiva técnica.

UCUENCA
CIENCIAS QUÍMICAS

ISBN: 978-9978-14-556-2

