



TENDENCIAS DE LARGO PLAZO EN LOS CAUDALES DE LA CUENCA AMAZÓNICA Y SU RELACIÓN CON EL ÁREA DE LA CUENCA

Daniela Posada Gil¹, Germán Poveda²

RESUMEN

Este trabajo tiene por objeto realizar una búsqueda de tendencias de largo plazo en 115 series de caudales medios mensuales en ríos de la cuenca amazónica, durante el periodo comprendido entre Enero de 1979 y Diciembre de 2010. Usamos la Descomposición en Modos Empíricos (EMD) con el propósito de filtrar los principales modos de variabilidad temporal de las series de caudales, y separar en cada serie de tiempo la función de modo intrínseca (IMF) del residuo, el cual captura las posibles tendencias de largo plazo existentes en las series de caudales. Sobre la serie del residuo aplicamos las pruebas estadísticas de Mann-Kendall para identificar la existencia de tendencias de largo plazo, y de Sen para estimar la magnitud de las tendencias identificadas. Los resultados evidencian la presencia de tendencias crecientes en 55 series de caudales medios mensuales (48%), tendencias decrecientes en 45 series de caudales (39%), y 14 series (15%) sin tendencias estadísticamente significativas. Las tendencias identificadas representan valores de disminución del caudal promedio mensual de hasta el 1.9%/año y de aumento de hasta el 4,1%/año en los ríos estudiados. En las series de caudales para las cuales encontramos tendencias crecientes y decrecientes, descubrimos la existencia de una relación potencial entre

la magnitud de la tendencia, T , en valor absoluto, y el área de drenaje de las cuencas hidrográficas, A , del tipo $T = cA^\theta$, lo cual sugiere que las tendencias encontradas responden a mecanismos físicos coherentes en las cuencas hidrográficas, entre los cuales se pueden incluir la deforestación y el cambio climático, y no a resultados del azar estadístico.

Palabras clave

Tendencias; Amazonia; Cambio climático; Descomposición en Modos Empíricos; Prueba Mann-Kendall; Prueba Sen; Ley Potencial.

ABSTRACT

This work aims at searching for long-term trends in 115 time series of monthly mean streamflows in the Amazon River basin, spanning the period from January 1979 to December 2010. Empirical Mode Decomposition (EMD) was used to filter out the main characteristic temporal variability modes of streamflows, and to isolate the residual Intrinsic Mode Function (IMF) that captures the likely existing long term trends in the hydrological records. The Mann-Kendall Test is further applied on the residual IMF to identify the presence of long-term

¹ Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, Facultad de Minas, Departamento de Geociencias y Medio Ambiente, Medellín, Colombia, dposadag@unal.edu.co

² Nacional de Colombia, Sede Medellín, Facultad de Minas, Departamento de Geociencias y Medio Ambiente, Medellín, Colombia, gpoveda@unal.edu.co

trends, and the Sen Test to estimate the magnitude of the identified trends. Our results evidence the existence of increasing trend in 55 streamflow series (49%), decreasing trends in 45 streamflow series (39%), and 14 streamflow series (15%) without any statistically significant trend. The identified trends show a decrease of up to 1.9% of the average flow per year and an increase of up to 4.1% of the average flow per year in the studied rivers. We found a clear-cut power law relating the magnitudes of the identified trends, T , with drainage area, A , such that $T=cA^p$, which points out that the identified trends are caused by physically consistent mechanisms, of which deforestation and climate change cannot be disregarded, and that the identified trends are not a random statistical artifact.

Keywords

Trends, Amazon, Climate change, Empirical Mode Decomposition, Mann-Kendall Test, Sen Test, Potential law.

INTRODUCCIÓN

La cuenca amazónica es uno de los tres centros de convección intensa cuasi-permanentes dentro de la zona ecuatorial, y es uno de los puntos críticos del sistema climático del planeta (Lenton *et al.*, 2008) (Rockström, *et al.*, 2009). El bosque amazónico regula el clima a nivel regional y global mediante evapotranspiración intensa (3 a 3.5mm/día (Nobre, Obregón, Marengo, Fu, & Poveda, 2009)), enfriando la atmósfera inferior mediante la evapotranspiración del bosque y bombeando calor latente a la atmósfera, balanceando la fuerte radiación de calor de la superficie. Durante el verano del hemisferio sur la convección intensa transporta calor latente a la alta tropósfera y lo distribuye a las zonas templadas. (Nobre, Marengo, & Artaxo, 2009).

Dado que la cuenca Amazónica es uno de los principales reguladores del clima a escalas global, continental, regional y local, es necesario investigar su dinámica hidrológica, climática, biogeoquímica y ecológica en un rango amplio de escalas espaciales y temporales (Nobre, Obregón, Marengo, Fu, & Poveda, 2009). En particular son preocupantes

los efectos del cambio climático, así como la deforestación y los cambios en los usos del suelo, sobre los balances e integridad de los ciclos del agua, energía y carbono en la Amazonia (D'Almeida *et al.*, 2006) (Mahli & Davidson, 2009). Estos temas y muchos otros relacionados con la biogeoquímica y la química atmosférica de la Amazonia han sido objeto de investigación para la porción de la cuenca amazónica localizada en Brasil por el Experimento de Gran Escala de la Biósfera-Atmósfera en la Amazonia (LBA por sus siglas en inglés; <http://www.lba.cnpm.embrapa.br/>), así como por el programa de investigación AMAZALERT (<http://www.eu-amazalert.org/>). Desafortunadamente no se ha hecho ningún esfuerzo de investigación semejante de las regiones de la cuenca amazónica localizadas en Colombia, Ecuador, Perú, Bolivia, Venezuela y las Guayanas.

El trabajo de D'Almeida *et al.* (2006) estima la más probable respuesta futura de las diferentes variables hidrológicas y climáticas, para diferentes escenarios de deforestación en la cuenca amazónica. Los resultados muestran que una deforestación total de la cuenca amazónica causaría el debilitamiento de los diferentes flujos de humedad, disminuyendo la precipitación reciclada.

El presente trabajo tiene por objeto identificar la presencia de tendencias estadísticas de largo plazo en un conjunto de 115 series de caudales promedios mensuales en estaciones de medición de ríos localizados sobre las principales sub-cuencas del Río Amazonas, que cuentan con periodos de registros entre 19 y 43 años. Adicionalmente, este trabajo plantea una pregunta fundamental que no es usual en los análisis de tendencias de largo plazo para las series de caudales de los ríos, que consiste en identificar si existe una relación entre las tendencias identificadas con el área de la cuenca, en los sitios de medición de los caudales localizados aguas abajo sobre la corriente principal de las mismas.

Para el efecto, el presente trabajo está distribuido de la siguiente manera; en el numeral 2 se describen los datos usados y las metodologías estadísticas usadas para la detección de tendencias en series hidrológicas de estudio. El numeral 3 presenta los resultados y las conclusiones se discuten en el numeral 4.

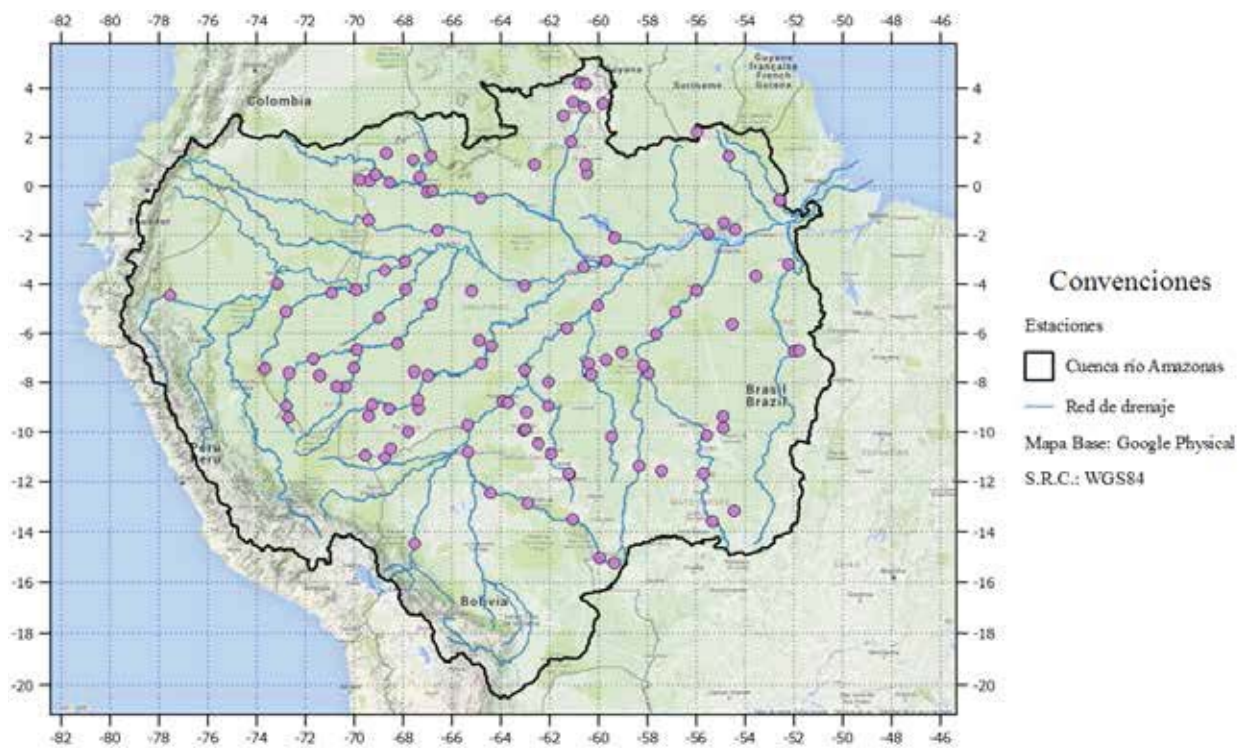


FIGURA 1. LOCALIZACIÓN DE LAS ESTACIONES DE MEDICIÓN DE CAUDALES PROMEDIOS MENSUALES USADAS EN ESTE TRABAJO. EL MAPA BASE UTILIZADO ES EL MAPA GOOGLE PHYSICAL DE GOOGLE MAPS (GOOGLE, 2015).

DATOS Y MÉTODOS

Datos

Los registros de caudales promedios mensuales de los ríos localizados en la cuenca amazónica fueron adquiridos en la base de datos del Observatorio de Investigación Ambiental de Geodinámica, Hidrología y Control de la Erosión en la Cuenca Amazónica (ORE HYBAM; <http://www.ore-hybam.org/>), así como también en la base de datos de la Agencia Nacional de Aguas de Brasil (ANA; www.ana.gov.br/). Para los análisis se usan 115 series de caudales promedios mensuales de ríos localizados en la cuenca del río Amazonas, cuyas estaciones de aforo se distribuyen geográficamente como se muestra en la Figura 1. Los detalles de la localización, periodos de registro y porcentaje de datos faltantes se presentan en las columnas 4 a 9 de la *Tabla 1*.

Las series de caudales medios mensuales fueron construidas a partir de datos diarios, tomando como mínimo el 50% de los días de cada mes para calcular el valor promedio mensual. El periodo de registro

escogido para este estudio es el comprendido entre Enero de 1979 y Diciembre de 2010. Dado que el método de Descomposición en Modos Empíricos requiere que las series de tiempo no contengan datos faltantes, éstos se reconstruyeron mediante un método basado en el Análisis Singular Espectral del conjunto de series y la metodología descrita en Kondrashov & Ghil (2006). En ningún caso se usaron series con más del 30% de registros faltantes en el periodo de registro seleccionado.

Métodos de análisis

El procedimiento para la detección de tendencias de largo plazo en las series de caudales promedios mensuales de la cuenca amazónica es similar al usado para la detección de tendencias en series de registros de diversas variables hidrológicas y climáticas de Colombia (Carmona & Poveda, 2014). Consiste en utilizar el método conocido como Descomposición en Modos Empíricos (EMD, por sus siglas en inglés) (Huang & Wu, 2006) para separar las componentes periódicas de distintas frecuencias contenidas en una serie de tiempo, de tal manera que el residuo

se use para identificar las posibles tendencias de largo plazo de las series hidrológicas. El método de EMD se describe a continuación.

Descomposición en Modos Empíricos (EMD)

Las series de tiempo hidrológicas son resultado de la superposición de distintos modos de variabilidad temporal asociados con diferentes fenómenos periódicos ó cuasi-periódicos, como los ciclos anual (12 meses), semi-anual (6 meses), intraanuales [30-60 días, posiblemente asociados con la Oscilación Intraestacional (ISO) o la Oscilación de Madden-Julian (Zhang, 2005)] así como por el evento El Niño/Oscilación del Sur (ENSO), el fenómeno cuasi-periódico (2 a 7 años) de mayor influencia del clima y de la hidrología global a escala de tiempo interanual. Además también aparecen componentes periódicas de más largo plazo como la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO, (Mantua & Hare, 2002), la Oscilación del Atlántico Norte (NAO, (Hurrell, Kushnir, Ottersen, & Visbeck, 2003)) y la Oscilación Multidecadal del Atlántico (AMO) (Knight, Folland, & Scaife, 2006), entre otras.

El método de EMD es adecuado para el análisis de series de tiempo no lineales y no estacionarias,

como las series de caudales promedios mensuales, ya que transforma las series de tiempo en un reducido número de Funciones de Modo Intrínsecas (IMF), que a diferencia de otros métodos (como la transformada de Fourier que descompone las series en sumas de series armónicas de senos y cosenos), no impone condiciones matemáticas arbitrarias a la naturaleza de los datos. El método de EMD permite que cada IMF tenga diferentes frecuencias y amplitudes variables en el tiempo y descompone la serie en IMFs que se derivan de los mismos datos, cada una asociada con los diferentes modos oscilatorios embebidos en la serie de tiempo original (Huang & Wu, 2006).

El método de EMD consiste en aplicar a la serie original los siguientes procedimientos: (1) Identificar los máximos y mínimos locales de la serie original (ver *Figura 2 b*). (2) Unir los máximos locales mediante una envolvente diferenciable, definida en porciones mediante polinomios cúbicos; hacer lo mismo con los mínimos locales y calcular el promedio de las dos envolventes (ver *Figura 2 c*). (3) Restar a la serie original el promedio de las envolventes, obteniendo la primera proto-IMF (ver *Figura 2 d*). (4) Aplicar nuevamente el procedimiento sobre la primera proto-IMF, para obtener la siguiente, hasta que el resultado cumpla con las siguientes condiciones: (i) el número de veces que la IMF cruza por

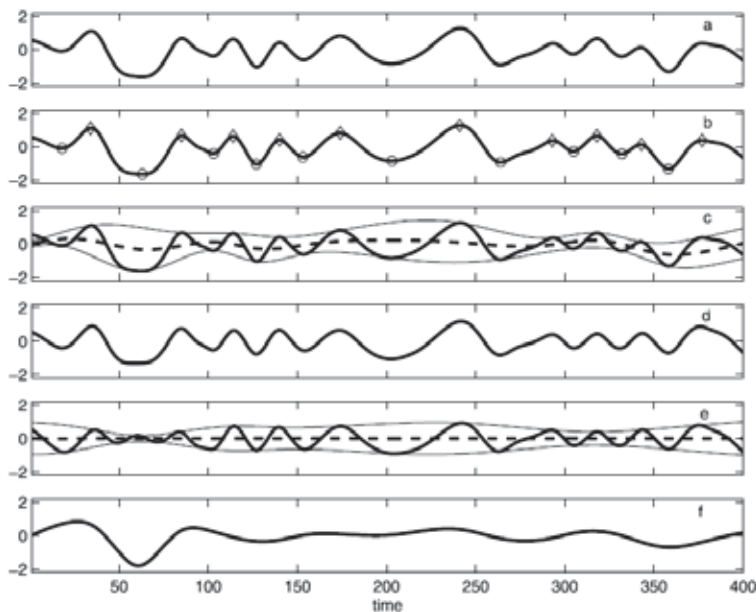


FIGURA 2. DESCRIPCIÓN DEL PROCEDIMIENTO PARA REALIZAR EMD. EN (A) SE MUESTRA LA SERIE ORIGINAL. EN (B) LOS MÁXIMOS CON DIAMANTES, Y LOS MÍNIMOS CON CÍRCULOS. EN (C) LA ENVOLVENTE DE MÁXIMOS, DE MÍNIMOS Y EL PROMEDIO EN LÍNEA PUNTEADA. EN (D) EL PRIMER PROTO-IMF. EN (E) LA SEGUNDA ITERACIÓN. EN (F) LA PRIMERA IMF. TOMADO DE (HUANG & WU, 2006)

cero y el número de máximos y mínimos es igual o difiere máximo en uno; (ii) el número de máximos y mínimos permanece igual durante S iteraciones ($3 < S < 8$). Con esto se llega a la primera IMF y al primer residuo que resulta de restar a la serie original la IMF encontrada. El primer residuo aún contiene varias IMFs de menores frecuencias, por lo que se debe repetir el procedimiento sobre el residuo para encontrar las otras IMFs, hasta que se llega a una función monótonica o con sólo un extremo, de la que no es posible extraer más IMFs, y la cual constituye el residuo de la serie. El resultado de la suma de todas las IMFs y el residuo es la serie original (Huang & Wu, 2006). En este trabajo se usará sólo el residuo de cada serie, que refleja la tendencia general de la misma, debido a que el procedimiento de descomposición filtra los modos de variabilidad de la serie.

Prueba de Mann-Kendall para datos Autocorrelacionados

La detección de tendencias es interesante en estudios hidrológicos ya que permite cuantificar cambios en el tiempo en la función de distribución de probabilidades (FDP) de los registros históricos. Existen pruebas paramétricas y no paramétricas para detectar tendencias; las paramétricas requieren que los datos sean independientes y exhiban una FDP Gaussiana o Normal. El hecho de realizar tales pruebas sobre datos que no cumplan estas condiciones aumenta la probabilidad de detectar tendencias espurias en series en las que realmente no existen. La prueba original de Mann-Kendall es una prueba paramétrica, pero en Hamed & Rao (1998) se propone una prueba Mann Kendall modificada que tiene en cuenta el coeficiente de correlación de los datos, En el presente estudio se usará esta última, cuyo procedimiento se explica a continuación:

1) Se calcula el estadístico S , como se muestra a continuación en la ecuación [1]:

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sign}(x_j - x_k) \quad [1]$$

en donde:

$$\text{sign}(x_j - x_k) = \begin{cases} 1, & \text{si } (x_j - x_k) > 0 \\ 0, & \text{si } (x_j - x_k) = 0 \\ -1, & \text{si } (x_j - x_k) < 0 \end{cases} \quad [2]$$

2) Se determina la varianza de S , mediante la ecuación [3]:

$$V^*(s) = \left(\frac{n(n-1)(2n-5)}{18} \right) \left(\frac{n}{n_s^*} \right) \quad [3]$$

en donde:

$$\left(\frac{n}{n_s^*} \right) = 1 + \frac{2}{n(n-1)(n-2)} \cdot \sum_{i=1}^{n-1} (n-i)(n-i-1)(n-i-2)\rho_s(i) \quad [4]$$

en donde a su vez $\rho_s(i)$ es el valor del coeficiente de autocorrelación de rezago i de la serie, y n es el número de datos. Para determinar si existe o no tendencia en la serie se calcula el estadístico de prueba Z , que es el valor estandarizado de S , el cual se estima mediante la ecuación [5]:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{[VAR(S)]^{1/2}}, & \text{si } S > 0 \\ 0, & \text{si } S = 0 \\ \frac{S+1}{[VAR(S)]^{1/2}}, & \text{si } S < 0 \end{cases} \quad [5]$$

3) Se compara el estadístico Z con Z_{crit} , que es el valor de la variable Normal estándar para el que la probabilidad acumulada a la derecha es igual a $1-\alpha$, con α igual a la confiabilidad deseada, si Z es menor que Z_{crit} la tendencia no es significativa.

Prueba Sen para estimar la magnitud de la tendencia

Esta prueba se usa para cuantificar la magnitud de la tendencia general de la serie. Consiste en calcular las pendientes entre cada pareja de datos consecutivos; la mediana de las pendientes es la magnitud de la tendencia de la serie. Este método sólo se puede aplicar a series con datos igualmente espaciados en el tiempo y no asume que los datos tengan una distribución estadística específica (Sen, 1968).

RESULTADOS

Se aplicó el método de EMD a las series de registros de caudales promedios mensuales listadas en la *Tabla 1*, filtrando las componentes periódicas asociadas

con la variabilidad hidrológica natural, y aislando el residuo de largo plazo de cada serie. La *Figura 3* ilustra las series originales de algunos ríos, así como las diferentes IMFs encontradas y el residuo.

TABLA 1. LOCALIZACIÓN DE LAS SERIES DE CAUDALES PROMEDIOS MENSUALES UTILIZADOS EN EL ESTUDIO EN LAS COLUMNAS 4 Y 5. ÁREA DE DRENAJE AFERENTE EN LA COLUMNA 6. PERIODO ORIGINAL DE REGISTRO Y PORCENTAJE DE DATOS FALTANTES EN LAS COLUMNAS 7-9. RESULTADOS DE LA PRUEBA MANN-KENDALL EN LA COLUMNA 10. RESULTADOS DE LA PRUEBA SEN DE MAGNITUD DE TENDENCIA EN UNIDADES DE (M³/S)/AÑO EN LA COLUMNA 11, Y EXPRESADO COMO PORCENTAJE DEL CAUDAL PROMEDIO MULTIANUAL POR AÑO EN LA COLUMNA 12. CAUDAL PROMEDIO MULTIANUAL EN LA COLUMNA 13.

Código estación	Nombre	Fuente	Coordenadas (WGS84)		Área [km ²]	Periodo original de Registro		Meses faltantes [%]	Tendencia			Q _{med}
			Lon (°)	Lat(°)		Fecha inicial (mes-año)	Fecha final (mes-año)		Significativa P>0.95	Tendencia [(m ³ /s)/año]	Tendencia [(%/año)]	
17420000	Tres Marias	HYBAM	-57.95	-7.61	138000	enero-76	diciembre-10	25	no	-8.608	-0.237%	3637
15558000	Pimenta Bueno	HYBAM	-61.19	-11.68	10100	enero-81	diciembre-10	12	no	-0.615	-0.297%	207
12650000	Feijo	HYBAM	-70.37	-8.15	17000	enero-81	diciembre-10	17	no	-0.502	-0.099%	509
12880000	Estirao Da Santa Cruz	HYBAM	-65.20	-4.29	13700	enero-82	diciembre-10	23	no	-0.368	-0.066%	558
15565000	Jaru	HYBAM	-62.47	-10.45	3960	enero-82	diciembre-10	21	no	-0.007	-0.007%	94
12200000	Barreira Alta	HYBAM	-67.90	-4.23	35500	enero-81	diciembre-09	27	no	0.002	0.000%	1649
13470000	Brasília	ANA	-68.75	-11.02	7020	enero-82	diciembre-11	14	no	0.049	0.040%	122
12360000	Foz Do Breu	HYBAM	-72.70	-9.40	7690	enero-83	diciembre-10	17	no	0.050	0.029%	173
14845000	Fazenda Sao Jose	HYBAM	-60.47	0.52	5670	enero-84	diciembre-10	30	no	0.313	0.184%	171
13740000	Fazenda Borangaba	HYBAM	-67.55	-7.55	23300	enero-85	diciembre-10	26	no	0.366	0.046%	792
18850000	Altamira	HYBAM	-52.21	-3.21	448000	enero-69	diciembre-10	2	no	0.739	0.009%	7897
12500000	Cruzeiro Do Sul	HYBAM	-72.68	-7.61	37800	enero-68	diciembre-09	8	no	3.024	0.321%	943
15030000	Jatuarana	HYBAM	-59.68	-3.05	2930000	enero-78	diciembre-10	0	no	12.594	0.010%	124465
17500000	Fortaleza	ANA	-57.64	-6.05	363000	enero-83	diciembre-09	30	no	19.171	0.192%	10002
14100000	Manacapuru	HYBAM	-60.61	-3.31	2147736	enero-72	diciembre-10	1	no	91.855	0.091%	101114
13150000	Itapeua	HYBAM	-63.03	-4.06	1780000	enero-72	diciembre-10	1	si	-218.375	-0.267%	81934
10075000	Tamishiyacu	ANA	-73.16	-4.00	8985	enero-03	diciembre-10	20	si	-199.171	-0.845%	23562
15320002	Abuna	HYBAM	-65.36	-9.70	921000	enero-77	diciembre-10	11	si	-169.429	-0.954%	17758
15400000	Porto Velho	HYBAM	-63.92	-8.74	976000	enero-68	diciembre-10	0	si	-149.931	-0.795%	18852
15860000	Fazenda Vista Alegre	HYBAM	-60.03	-4.90	1310000	enero-68	diciembre-10	0	si	-107.156	-0.384%	27881
15250000	Guajara-Mirim	HYBAM	-65.35	-10.79	609000	enero-71	diciembre-10	2	si	-89.024	-1.136%	7834
18460000	Boa Sorte	HYBAM	-51.98	-6.75	210000	enero-77	diciembre-10	17	si	-65.272	-1.925%	3392
15630000	Humaita	HYBAM	-63.02	-7.51	1090000	enero-68	diciembre-10	6	si	-50.096	-0.238%	21009
17730000	Itaituba	HYBAM	-55.98	-4.28	458000	enero-69	diciembre-10	3	si	-42.030	-0.353%	11917
17650000	Jatoba	HYBAM	-56.85	-5.15	387000	enero-73	diciembre-10	12	si	-37.855	-0.356%	10640
12850000	Acanai	HYBAM	-66.60	-1.82	249000	enero-74	diciembre-10	2	si	-17.223	-0.122%	14070
17430000	Barra Do Sao Manuel Jusante	HYBAM	-58.16	-7.34	333000	enero-76	diciembre-10	13	si	-14.610	-0.181%	8074
12680000	Envira	HYBAM	-70.02	-7.43	49700	enero-78	diciembre-10	4	si	-9.899	-0.795%	1244
17093000	Fontanilhas	HYBAM	-58.34	-11.36	55900	enero-78	diciembre-10	7	si	-9.596	-0.661%	1451
12520000	Ipixuna	HYBAM	-71.68	-7.05	56100	enero-82	diciembre-10	13	si	-8.328	-0.612%	1361
15200000	Príncipe Da Beira	HYBAM	-64.43	-12.43	341000	enero-84	diciembre-10	22	si	-4.410	-0.176%	2501
15800000	Boca Do Guariba	HYBAM	-60.30	-7.68	70100	enero-78	diciembre-10	1	si	-4.280	-0.296%	1446
13180000	Manoel Urbano	HYBAM	-69.27	-8.88	32800	enero-82	diciembre-09	28	si	-3.859	-0.453%	851
12370000	Taumaturgo	HYBAM	-72.78	-8.93	16100	enero-82	diciembre-10	11	si	-3.829	-0.998%	384
12700000	Santos Dumont	HYBAM	-68.24	-6.44	144000	enero-82	diciembre-10	14	si	-3.524	-0.085%	4161
17120000	Porto Dos Gauchos	HYBAM	-57.42	-11.54	37100	enero-74	diciembre-10	3	si	-3.440	-0.484%	711
14230000	Missao Icana	HYBAM	-67.59	1.07	23200	enero-81	diciembre-10	6	si	-3.053	-0.163%	1868
10200000	Palmeiras Do Javari	HYBAM	-72.80	-5.13	16500	enero-83	diciembre-10	16	si	-2.541	-0.413%	615
13550000	Xapuri	HYBAM	-68.51	-10.65	8270	enero-69	diciembre-10	14	si	-2.298	-1.227%	187
15150000	Pedras Negras	HYBAM	-62.90	-12.85	110000	enero-81	diciembre-09	16	si	-2.292	-0.256%	896
15700000	Manicore	HYBAM	-61.30	-5.82	1150000	enero-68	diciembre-10	8	si	-1.712	-0.006%	27054
12600001	Tarauaca-Jusante	HYBAM	-70.72	-8.14	15600	enero-82	diciembre-10	29	si	-1.589	-0.384%	414

Código estación	Nombre	Fuente	Coordenadas (WGS84)		Área [km ²]	Periodo original de Registro		Meses faltantes [%]	Tendencia			Q _{med}
			Lon (°)	Lat(°)		Fecha inicial (mes-año)	Fecha final (mes-año)		Significativa P>0.95	Tendencia [(m ³ /s)/año]	Tendencia [(%)/año]	
13600002	Rio Branco	HYBAM	-67.80	-9.98	23500	enero-68	diciembre-10	2	si	-1.355	-0.434%	313
15650000	Maloca Tenharim	HYBAM	-62.05	-7.96	3550	enero-79	diciembre-10	21	si	-1.347	-0.910%	148
13650000	Floriano Peixoto	HYBAM	-67.37	-9.05	34400	enero-68	diciembre-10	10	si	-1.294	-0.206%	628
14350000	Jusante Da Cachoeira Do Caju	HYBAM	-67.01	-0.25	13200	enero-83	diciembre-10	13	si	-0.890	-0.094%	944
15120001	Vila Bela Da Santis.Trindade	HYBAM	-59.95	-15.01	22500	enero-77	diciembre-10	7	si	-0.878	-0.700%	125
15550000	Santa Isabel	HYBAM	-63.71	-8.80	12600	enero-77	diciembre-10	2	si	-0.723	-0.226%	320
17200000	Porto Roncador	HYBAM	-55.33	-13.56	10800	enero-74	diciembre-10	8	si	-0.714	-0.262%	272
18420000	Fazenda Itaguacu	HYBAM	-54.44	-13.14	3840	enero-78	diciembre-10	8	si	-0.713	-0.893%	80
17280000	Cachoeirao	HYBAM	-55.70	-11.65	34600	enero-76	diciembre-10	11	si	-0.679	-0.083%	821
14310000	Cunuri	HYBAM	-69.38	0.21	4260	enero-83	diciembre-10	14	si	-0.590	-0.189%	313
15430000	Ariquemes	HYBAM	-63.06	-9.93	8110	enero-71	diciembre-10	7	si	-0.473	-0.260%	182
12400000	Serra Do Moa	ANA	-73.66	-7.45	1030	enero-73	diciembre-11	5	si	-0.470	-1.549%	30
14530000	Vila Surumu	HYBAM	-60.79	4.20	2280	enero-84	diciembre-10	21	si	-0.423	-0.558%	76
10064000	Borja	HYBAM	-77.55	-4.47	4179	enero-87	diciembre-10	25	si	-0.371	-0.007%	4955
15050000	Pontes E Lacerda	HYBAM	-59.35	-15.22	2990	enero-72	diciembre-10	7	si	-0.344	-0.618%	56
12530000	fazenda Paranacre	ANA	-71.42	-7.72	2070	enero-82	diciembre-11	25	si	-0.285	-0.658%	43
14300000	Pari Cachoeira	HYBAM	-69.79	0.25	1970	enero-81	diciembre-10	13	si	-0.167	-0.133%	126
15431000	Fazenda Rio Branco	HYBAM	-62.99	-9.89	989	enero-80	diciembre-10	6	si	-0.039	-0.165%	24
17345000	Base Do Cachimbo	ANA	-54.90	-9.36	465	enero-80	diciembre-05	23	si	0.082	0.340%	24
15750000	Humboldt	HYBAM	-59.46	-10.17	15200	enero-80	diciembre-10	15	si	0.129	0.042%	311
19100000	Iratapuru	HYBAM	-52.58	-0.56	4470	enero-81	diciembre-10	15	si	0.133	0.188%	71
13405000	Seringal Guarany	HYBAM	-69.42	-9.35	6110	enero-83	diciembre-10	23	si	0.313	0.244%	128
13410000	Seringal Da Caridade	HYBAM	-68.57	-9.04	63100	enero-68	diciembre-10	6	si	0.395	0.030%	1333
16700000	Tirios	HYBAM	-55.96	2.22	819	enero-80	diciembre-09	15	si	0.411	2.300%	18
14220000	Louro Poco	HYBAM	-68.69	1.34	4600	enero-83	diciembre-07	24	si	0.490	0.162%	303
15130000	Pimenteiras	HYBAM	-61.05	-13.48	54200	enero-84	diciembre-09	20	si	0.501	0.096%	522
13450000	Assis Brasil	HYBAM	-69.55	-10.93	3760	enero-84	diciembre-10	28	si	0.527	0.968%	54
12550000	Eirunepe-Montante	HYBAM	-69.90	-6.68	77300	enero-80	diciembre-10	8	si	0.529	0.029%	1801
15930000	Acari Br-230	HYBAM	-59.69	-7.10	4970	enero-85	diciembre-10	29	si	0.639	0.352%	181
15432000	Mínera 7 Ao Ponte Massangana	HYBAM	-62.95	-9.18	843	enero-81	diciembre-10	10	si	0.686	2.668%	26
12100000	Colocacao Caxias	HYBAM	-69.00	-5.40	10700	enero-83	diciembre-10	23	si	0.773	0.163%	474
18250000	Uruara	HYBAM	-53.55	-3.68	2960	enero-79	diciembre-10	12	si	0.830	2.055%	40
14550000	Maloca Do Contao	HYBAM	-60.53	4.17	5780	enero-76	diciembre-10	4	si	1.023	0.647%	158
17350000	Cachimbo	HYBAM	-54.89	-9.82	1010	enero-80	diciembre-10	3	si	1.148	2.963%	39
15910000	Sucunduri	HYBAM	-59.04	-6.80	12700	enero-74	diciembre-10	2	si	1.405	0.348%	404
14280001	Taraqua	HYBAM	-68.54	0.13	44700	enero-78	diciembre-10	4	si	1.723	0.063%	2738
15559000	Sitio Bela Vista	HYBAM	-61.22	-11.65	16100	enero-85	diciembre-10	27	si	2.515	0.681%	369
18200000	Arapari	HYBAM	-54.40	-1.78	12400	enero-73	diciembre-10	2	si	2.773	2.355%	118
18280000	Apalai	HYBAM	-54.66	1.22	7230	enero-81	diciembre-10	9	si	3.045	2.137%	142
14440000	Posto Ajuricaba	HYBAM	-62.62	0.88	16900	enero-83	diciembre-10	14	si	3.446	0.696%	495
14850000	Base Alalau	HYBAM	-60.52	0.86	7090	enero-78	diciembre-10	20	si	3.590	1.668%	215
14495000	Fazenda Cajupiranga	HYBAM	-61.04	3.44	36900	enero-80	diciembre-10	12	si	3.623	0.323%	1122
17340000	Indeco	HYBAM	-55.57	-10.11	52200	enero-76	diciembre-10	7	si	4.323	0.371%	1164
15830000	Praíha Velha	HYBAM	-60.40	-7.25	131000	enero-75	diciembre-09	7	si	4.403	0.138%	3192
12840000	Gaviao	HYBAM	-66.85	-4.84	164000	enero-73	diciembre-10	2	si	4.650	0.099%	4675
10500000	Estirao Do Repouso	HYBAM	-70.93	-4.37	61400	enero-81	diciembre-10	8	si	4.752	0.190%	2499
14260000	Uaracu	HYBAM	-69.13	0.48	40600	enero-78	diciembre-10	2	si	4.855	0.200%	2422
14680001	Fc E Esperanca	HYBAM	-61.44	2.87	12200	enero-74	diciembre-10	3	si	4.981	1.652%	302
15275100	Rurrenabaque	HYBAM	-67.53	-14.45	70000	enero-68	diciembre-10	0	si	5.810	0.291%	1997
15580000	Tabajara	HYBAM	-62.05	-8.93	60200	enero-78	diciembre-09	13	si	6.034	0.418%	1445
17090000	Boca Do Inferno	HYBAM	-54.87	-1.50	19800	enero-74	diciembre-10	3	si	6.132	4.099%	150
18650000	Cajueiro	HYBAM	-54.52	-5.65	35600	enero-76	diciembre-10	7	si	6.228	0.743%	838
14526000	Bom Fim	HYBAM	-59.82	3.38	9620	enero-85	diciembre-10	19	si	6.354	2.983%	213
13710001	Valparaiso	HYBAM	-67.40	-8.68	105000	enero-76	diciembre-10	5	si	6.885	0.329%	2095

TENDENCIAS DE LARGO PLAZO EN LOS CAUDALES DE LA CUENCA AMAZÓNICA Y SU RELACIÓN CON EL ÁREA DE LA CUENCA

Código estación	Nombre	Fuente	Coordenadas (WGS84)		Área [km ²]	Periodo original de Registro		Meses faltantes [%]	Tendencia			Q _{med}
			Lon (°)	Lat(°)		Fecha inicial (mes-año)	Fecha final (mes-año)		Significativa P>0.95	Tendencia [(m3/s)/año]	Tendencia [(%)/año]	
15560000	Ji-Parana	HYBAM	-61.94	-10.87	32800	enero-78	diciembre-10	10	si	7.210	0.998%	723
13870000	Labrea	HYBAM	-64.80	-7.25	226000	enero-68	diciembre-10	1	si	7.235	0.130%	5551
12845000	Vila Bittencourt	HYBAM	-69.42	-1.40	206000	enero-80	diciembre-10	5	si	7.571	0.056%	13604
13750000	Seringal Fortaleza	HYBAM	-66.98	-7.72	154000	enero-68	diciembre-10	2	si	7.976	0.211%	3774
16100000	Cachoeira Morena	ANA	-59.34	-2.11	20400	enero-73	diciembre-11	15	si	8.508	1.269%	671
13886000	Bacaba	HYBAM	-64.88	-6.32	37800	enero-80	diciembre-10	13	si	9.019	0.571%	1581
14515000	Fazenda Passarao	HYBAM	-60.57	3.21	50200	enero-78	diciembre-10	7	si	11.098	0.792%	1400
14330000	Curicuriari	HYBAM	-66.80	-0.20	195000	enero-78	diciembre-10	0	si	12.942	0.108%	11947
18500000	Boa Esperanca	HYBAM	-51.78	-6.72	42400	enero-76	diciembre-10	15	si	15.498	1.638%	946
14110000	Cucui	HYBAM	-66.85	1.22	74900	enero-81	diciembre-10	7	si	17.814	0.361%	4931
14710000	Caracarai	HYBAM	-61.12	1.82	126000	enero-67	diciembre-10	0	si	20.173	0.687%	2936
13880000	Canutama	HYBAM	-64.38	-6.53	236000	enero-73	diciembre-10	4	si	21.016	0.324%	6495
19150000	Sao Francisco	HYBAM	-52.58	-0.57	51500	enero-73	diciembre-10	2	si	23.519	2.186%	1076
14420000	Serrinha	HYBAM	-64.83	-0.48	294000	enero-68	diciembre-10	0	si	24.625	0.151%	16303
14250000	Sao Felipe	HYBAM	-67.31	0.37	125000	enero-78	diciembre-10	0	si	27.549	0.346%	7966
10100000	Tabatinga	HYBAM	-69.93	-4.25	874000	enero-83	diciembre-10	13	si	37.621	0.105%	35842
11500000	Santo Antonio Do Ica	HYBAM	-67.93	-3.08	1130000	enero-74	diciembre-10	3	si	158.418	0.291%	54388
11400000	Sao Paulo De Olivenca	HYBAM	-68.75	-3.45	1010000	enero-74	diciembre-10	0	si	216.192	0.464%	46544
17050001	Obidos	HYBAM	-55.51	-1.95	4670000	enero-69	diciembre-10	0	si	437.104	0.255%	171593



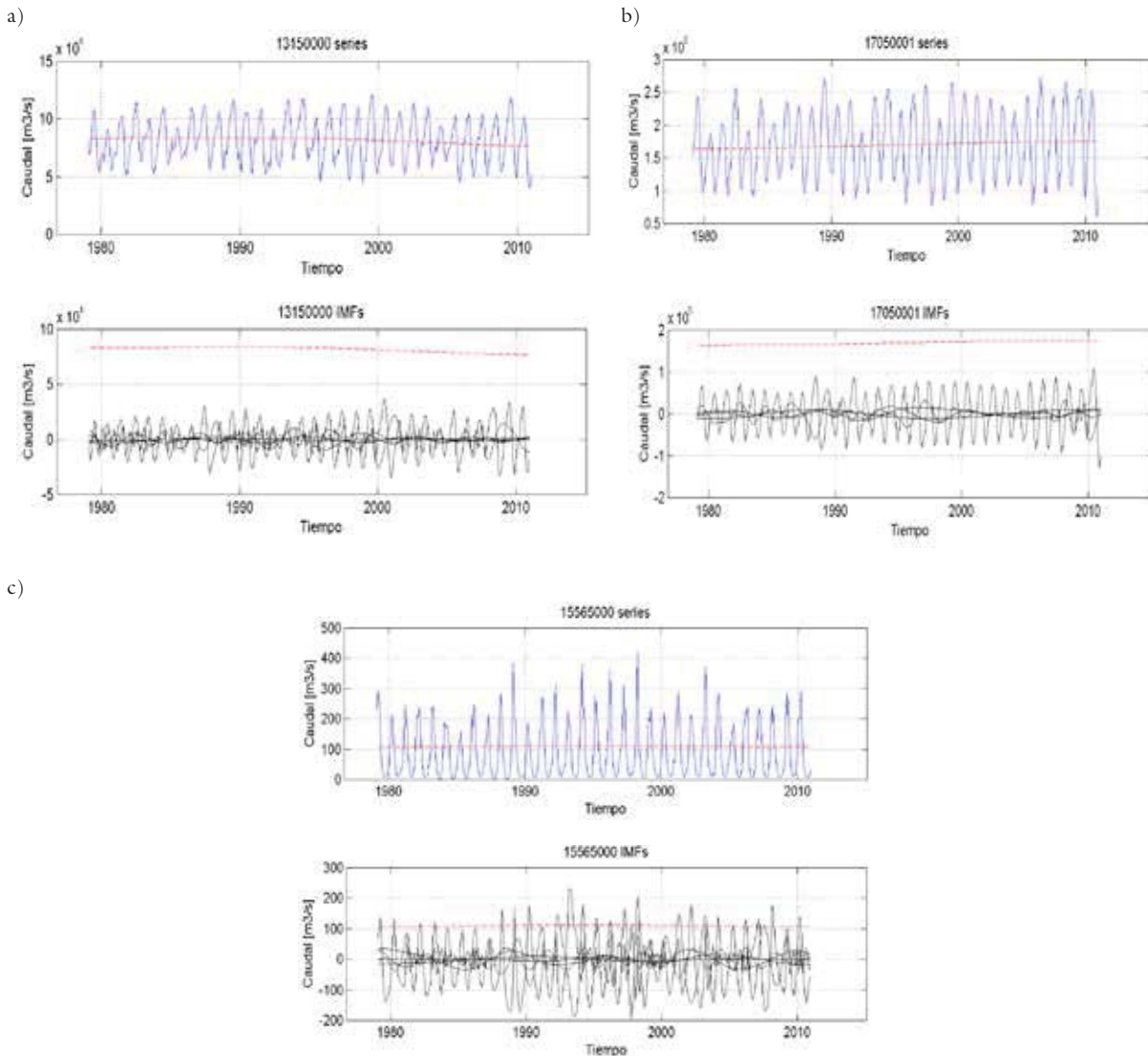


FIGURA 3. EN (A), (B) Y (C) SE MUESTRA PARA CADA NUMERAL LAS IMFS DE LA RESPECTIVA ESTACIÓN EN UNA LÍNEA CONTINUA, NEGRA; EL RESIDUO EN UNA LÍNEA ROJA, PUNTEADA; Y LA SERIE ORIGINAL EN UNA LÍNEA CONTINUA, AZUL. EN (A) SE OBSERVA LA SERIE DE LA ESTACIÓN ITAPETUA CON TENDENCIA SIGNIFICATIVA Y DECRECIENTE DE $-218.38 \text{ (M}^3\text{/S)}/\text{AÑO}$. LA SERIE USADA EN (B) CORRESPONDE A LA ESTACIÓN OBIDOS Y EXHIBE UNA TENDENCIA SIGNIFICATIVA POSITIVA DE MAGNITUD $437.10 \text{ (M}^3\text{/S)}/\text{AÑO}$. LA SERIE DE (C) CORRESPONDE A LA ESTACIÓN JARU Y NO PRESENTA UNA TENDENCIA SIGNIFICATIVA.

El análisis de los resultados consignados en la *Tabla 1* permite concluir que de las 115 series de caudales medios mensuales estudiadas, se identifican tendencias crecientes estadísticamente significativas en 55 estaciones (48%); tendencias decrecientes en 45 estaciones (39%), y sin tendencia se encontraron 15 estaciones (13%). Esto indica que no hay una tendencia generalizada para toda la cuenca amazónica, aunque para la estación Obidos, que es la que se encuentra más aguas abajo sobre el río Amazonas la tendencia del caudal medio mensual es creciente.

Sobre el mapa de la *Figura 4*, se muestra la distribución regional de las tendencias estimadas en este estudio, con la punta del triángulo denotando la presencia de tendencias crecientes (hacia arriba) y decrecientes (hacia abajo), y con área del triángulo siendo correlativa con la magnitud de la tendencia estimada. Se observa que las estaciones para las cuales se detectaron tendencias significativas mayores se ubican en las partes bajas de la cuenca amazónica. Los resultados no contradicen los de D'Almeida *et al.* (2006), para el modelo de balances hídricos, en

relación con la dependencia de las tendencias (positivas o negativas) con respecto a la escala espacial y al aumento en los caudales con la deforestación en algunas cuencas de escala menor, debido a la

disminución de la evapotranspiración ocasionada por la tala y quema de bosques (en la *Figura 4* se pueden observar las zonas magenta, que corresponden al área deforestada en el periodo 2000–2014).

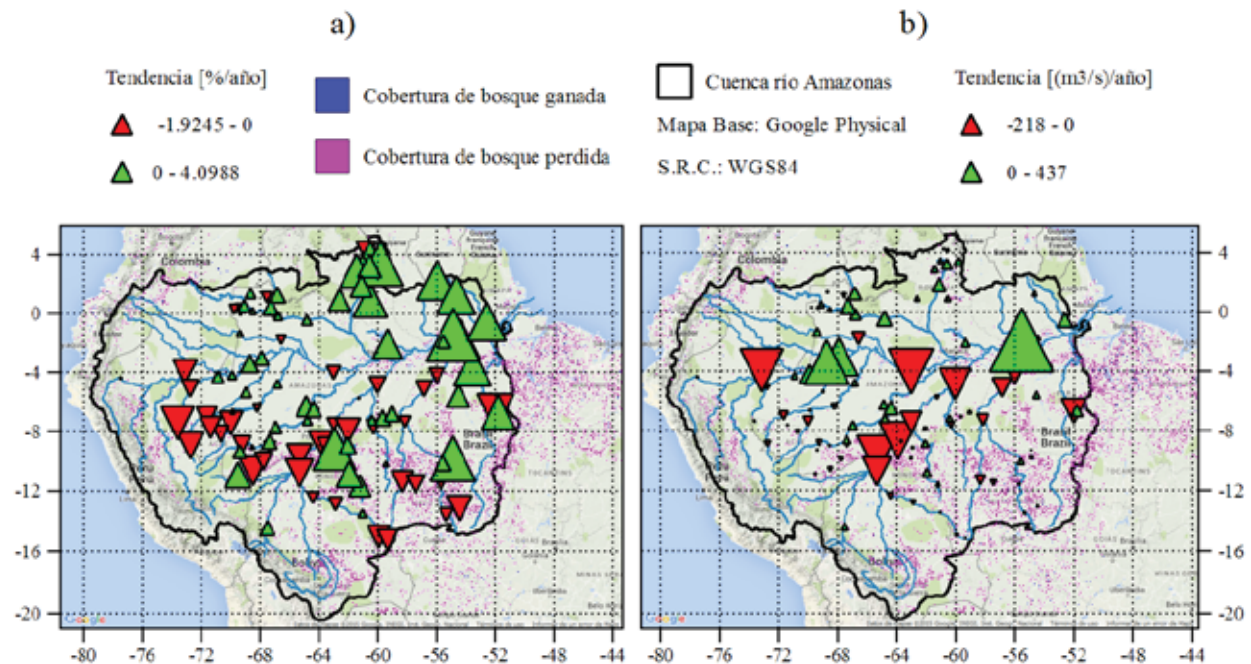


FIGURA 4. MAPA CON EL ÁREA DE LA CUENCA AMAZÓNICA DELIMITADA CON BORDE NEGRO. LA UBICACIÓN DE LAS ESTACIONES CON TENDENCIA SIGNIFICATIVA SE DENOTA CON LOS TRIÁNGULOS ROJOS Y VERDES. LA PUNTA HACIA ARRIBA Y EL COLOR VERDE DE LOS TRIÁNGULOS DENOTA TENDENCIA CRECIENTE, LA PUNTA HACIA ABAJO Y COLOR ROJO DENOTA TENDENCIA DECRECIENTE. EN (A) EL ÁREA DE CADA TRIÁNGULO ES PROPORCIONAL AL CAMBIO EN EL PORCENTAJE DEL CAUDAL MEDIO AL AÑO; EN (B) EL ÁREA ES PROPORCIONAL A LA MAGNITUD DE LA TENDENCIA EN $m^3s^{-1}año^{-1}$. EN MAGENTA Y AZUL SE MUESTRAN, RESPECTIVAMENTE, EL ÁREA DE BOSQUE PERDIDO DEL AÑO 2000 AL 2014 Y GANADO DEL AÑO 2000 AL 2012, SIN EMBARGO, LO GANADO ES TAN POCO QUE NO SE ALCANZA A VER A ESTA ESCALA (WORLD RESOURCES INSTITUTE, 2015)(HANSEN ET AL., 2013). EL MAPA BASE UTILIZADO ES EL MAPA GOOGLE PHYSICAL DE GOOGLE MAPS (GOOGLE, 2015).

Se encontró que las tendencias crecientes persisten en casi todas las estaciones ubicadas sobre la cuenca del río Negro, también en las estaciones sobre la cuenca del río Branco y en las ubicadas en la parte baja de la cuenca del río Purus. Por otro lado las tendencias decrecientes persisten en las estaciones ubicadas sobre las cuencas del río Madeira y el río Tapajos. En la cuenca del río Solimoes las tendencias crecientes persisten en la parte baja, pero en las estaciones ubicadas en la parte alta se encontraron mayoritariamente tendencias decrecientes.

En relación con los valores de las tendencias encontradas, La *Figura 5* muestra que la magnitud de las tendencias (T), en valor absoluto ($m^3 s^{-1} año^{-1}$), exhibe una relación potencial con el área de la cuenca (A), en miles de km^2 y con el caudal medio mensual (Q) en cientos de m^3s^{-1} , de tal forma

que para las tendencias crecientes, en términos del área $T=0.2695 A^{0.7573}$ ($R^2 = 0,64$), o en términos del caudal medio mensual multianual, $T=0.8052 Q^{0.6918}$ ($R^2 = 0,64$). Y para las tendencias decrecientes, en términos del Área, $T=0.1904 A^{0.812}$ ($R^2 = 0,67$), o en términos del caudal medio mensual, $T=0.4533 Q^{0.8622}$ ($R^2 = 0.73$).

Este resultado evidencia que la causa de las tendencias tiene un origen físico que se refleja en el crecimiento potencial de las tendencias con el caudal medio y el área de la cuenca. Es posible que la relación potencial del área con la tendencia sea heredada del caudal, ya que entre el caudal y el área aportante de la cuenca existen también relaciones que han sido ampliamente estudiadas (Salazar & Poveda, 2008). Es importante resaltar que esta relación se mantiene aun cuando las subcuencas de una misma cuenca

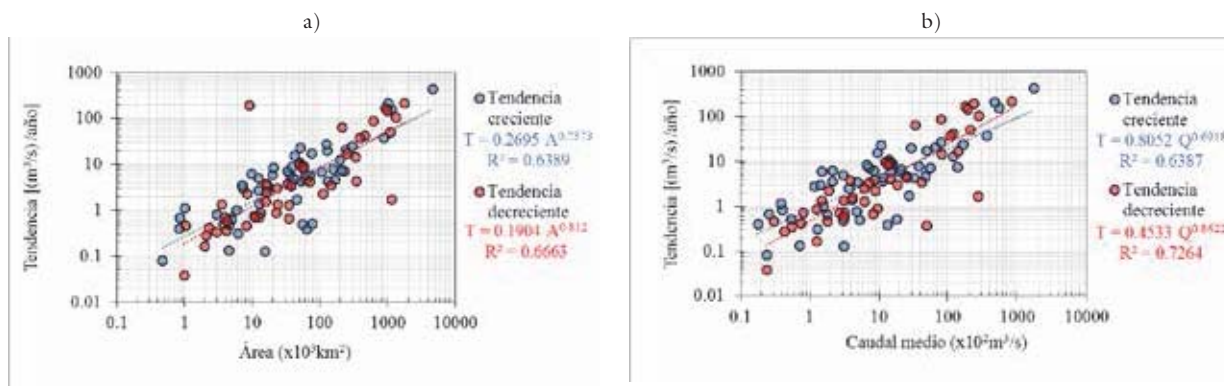


FIGURA 5. (A) REGRESIÓN POTENCIAL ENTRE LA MAGNITUD DE LA TENDENCIA Y EL ÁREA AFERENTE EN EL PUNTO DE MEDICIÓN. (B) REGRESIÓN POTENCIAL ENTRE LA MAGNITUD DE LA TENDENCIA Y EL CAUDAL MEDIO DE LA SERIE. LOS COLORES AZULES DENOTAN TENDENCIAS CRECIENTES Y LOS ROJOS TENDENCIAS DECRECIENTES.

no tengan una tendencia generalizada, como es el caso de la cuenca del río Solimoes, donde se presentan tendencias con signo negativo (decrecientes) en la parte alta y con signo positivo (crecientes) en la parte baja.

Los exponentes de las relaciones potenciales tienen valores entre 0 y 1. Estos valores del exponente de escalamiento obligan a que la segunda derivada de la función potencial sea negativa, lo que equivale a decir que la función es cóncava y su pendiente (o primera derivada) disminuye a medida que crecen los valores de caudal (o de área). La pendiente determina cuanto cambia el valor de la tendencia debido a un cambio en el valor del caudal medio mensual (o el área); la concavidad, o disminución de la pendiente de la función potencial puede interpretarse

entonces como una disminución para caudales medios mensuales mayores (áreas mayores) de la influencia que tiene un cambio en el caudal medio mensual sobre un cambio en la tendencia.

En la *Figura 6(a)* se observa que la mayor cantidad de estaciones para las que se detectaron tendencias negativas se ubican en la parte sur de la cuenca amazónica y las de tendencias positivas se encuentran mayormente en la parte norte. En Marengo (2004) los resultados hablan de incrementos en el largo plazo de la precipitación en la parte sur, y disminución de la misma en parte norte de la cuenca amazónica. Aunque se esperaría que los cambios en la precipitación sean coherentes con los cambios en el caudal, la diferencia puede deberse a las altas tasas de deforestación que han ocurrido entre el año

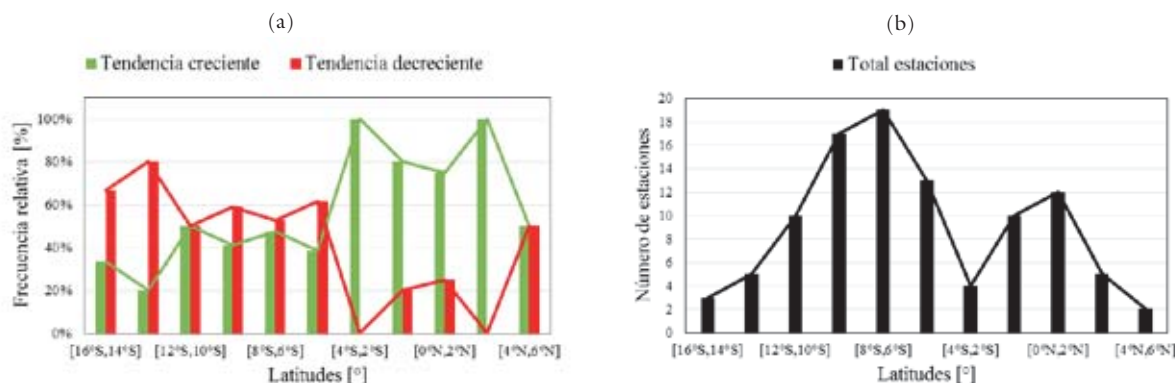


FIGURA 6. (A) PORCENTAJE DE ESTACIONES CON TENDENCIA CRECIENTE (VERDE) Y DECRECIENTE (ROJO), RELATIVO AL NÚMERO TOTAL DE ESTACIONES CON TENDENCIA SIGNIFICATIVA EN EL RANGO DE LATITUDES CORRESPONDIENTE (CADA BARRA CORRESPONDE A UN INTERVALO DE LATITUDES DE 2°). (B) NÚMERO DE ESTACIONES ESTUDIADAS CON TENDENCIA SIGNIFICATIVA PARA CADA RANGO DE LATITUDES. EL CAUCE PRINCIPAL DEL RÍO AMAZONAS SE ENCUENTRA ENTRE LATITUDES DE 4°S Y 2°S.

2000 y 2014, mayormente en la parte sur de la Amazonia (ver *Figura 4*).

CONCLUSIONES

Hemos investigado la existencia de tendencias de largo plazo en series de caudales promedios mensuales en ríos de la cuenca amazónica. Para ello se ha usado la metodología de EMD con el objeto de separar las series de caudales originales en sus componentes periódicas de distintas frecuencias, y considerar el residuo como las tendencias de largo plazo sobrepuestas en las series de caudales. La identificación de la significancia de las tendencias se realizó mediante la aplicación de la prueba de Mann-Kendall, y las magnitudes de las tendencias se estimaron mediante la prueba de Sen.

Los resultados permitieron identificar la presencia de tendencias crecientes en 55 series (48% del total de series), así como tendencias decrecientes en 45 series (39% del total), y 15 (13%) sin tendencias estadísticamente significativas. Las principales y mayores tendencias se identificaron en la estación Obidos, ubicada sobre el río Amazonas ($437.10 \text{ m}^3\text{s}^{-1} \text{ año}^{-1}$) y en la estación Itapetua, ubicada sobre el río Solimoes ($-218.38 \text{ m}^3\text{s}^{-1} \text{ año}^{-1}$). Los mayores cambios porcentuales se presentan en las cuencas del Río Xingu con una disminución del caudal promedio mensual de hasta el 1.9%/año y en la cuenca del río Curua con un aumento del caudal promedio mensual de hasta el 4,1%/año.

Adicionalmente, encontramos una relación potencial entre las magnitudes de las tendencias (T , en $\text{m}^3\text{s}^{-1} \text{ año}^{-1}$) encontradas con el área de drenaje (A , en miles de km^2) de las cuencas en los sitios de medición, y con el caudal medio mensual. Este resultado evidencia que la causa de las tendencias tiene un origen físico que se refleja en el crecimiento en forma de ley potencial de las tendencias con el área de la cuenca. Es necesario investigar las causas físicas de tal hallazgo estadístico, entre las cuales no se pueden descartar los efectos del cambio climático, la deforestación y los cambios en los usos del suelo en la cuenca amazónica.

Aunque en el trabajo de D'Almeida *et al.* (2006) se menciona un incremento en el corto plazo de

la precipitación con la deforestación parcial de la cuenca, que implica un aumento del caudal por la disminución en la evapotranspiración, también se dice que en un escenario de deforestación total habría un debilitamiento de los flujos de humedad que disminuiría la precipitación reciclada, y por lo tanto el caudal de la parte más continental de la Amazonia. Esto significa que existe un umbral antes de la deforestación total en el que la deforestación parcial de la cuenca pasaría de causar un aumento a causar una disminución en la precipitación, y por lo tanto en el caudal. La mayor cantidad de estaciones para las que se detectaron tendencias negativas en este estudio se ubican en la parte sur de la cuenca amazónica, donde de igual manera se encuentra el área más deforestada entre el año 2000 y 2014. Este resultado sugiere que en el futuro se debe investigar si en algunas subcuencas de la zona sur puede haberse sobrepasado este umbral de deforestación, si estas tendencias son coherentes con tendencias en la precipitación, y si estos cambios obedecen sólo a la deforestación o están relacionados con el cambio climático.

AGRADECIMIENTOS

El trabajo de D. Posada ha sido apoyado por el Programa de Investigación AMAZALERT (<http://www.eu-amazalert.org>), financiado por la Comunidad Europea. El trabajo de G. Poveda ha sido apoyado por la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, como una contribución a los programas de investigación AMAZALERT, y VACEA (<http://www.parc.ca/vacea/>), éste último financiado por la “*International Research Initiative on Adaptation to Climate Change*” (IRIACC) de Canadá.

BIBLIOGRAFÍA

- Carmona, A. M., & Poveda, G. (2014). Detection of long-term trends in monthly hydro-climatic series of Colombia through Empirical Mode Decomposition. *Climatic Change*, 123(2), 301-313.
- D'Almeida, C., Vörösmarty, C. J., Marengo, J. A., Hurtt, G. C., Dingman, L., & Keim, B. D. (2006). A water balance model to study the hydrological response to a different scenarios of

- deforestation in Amazonia. *Journal of Hydrology*, 125-136.
- Google. (2015). *Google Maps*. Obtenido de <https://developers.google.com/maps/>
- Hamed, K. H., & Rao, R. (1998). A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data. *Journal of Hydrology*, 182-196.
- Hansen, M., Potapov, P., Moore, R., y co-autores (2013). High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change. *Science*, 342(6160), 850-853. doi:10.1126/science.1244693.
- Huang, N. E., & Wu, Z. (2006). A review on Hilbert-Huang transform: Method and its applications to geophysical studies. *Rev. Geophys*, 46, RG2006, doi:10.1029/2007RG000228.
- Hurrell, J. W., Kushnir, Y., Ottensen, G., & Visbeck, M. (2003). An Overview of the North Atlantic Oscillation. *The North Atlantic Oscillation: Climatic Significance and Environmental Impact*(134). doi:10.1029/134GM01.
- Knight, J. R., Folland, C. K., & Scaife, A. A. (2006). Climate impacts of the Atlantic Multidecadal Oscillation. *Geophysical Research Letters*, 33(L17706). doi:10.1029/2006GL026242
- Kondrashov, D., & Ghil, M. (2006). Spatio-temporal filling of missing points in geophysical data sets. *Nonlinear Processes in Geophysics*(13), 151-159. doi:10.5194/npg-13-151-2006.
- Lenton, T. M., Held, H., Kriegler, E., Hall, J. W., Lucht, W., Rahmstorf, S., & Schellnhuber, H. J. (2008). Tipping elements in Earth's climate system. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 10(6), 1786-1793. doi:10.1073/pnas.0705414105
- Mahli, Y. & Davidson, E. A. (2009). Biogeochemistry and Ecology of Terrestrial Ecosystems of Amazonia. *Amazonia and Global Change* (186), 293-298. doi:10.1029/2009GM000905
- Mantua, N. J., & Hare, S. R. (Febrero de 2002). The Pacific Decadal Oscillation. *Journal of Oceanography*, 58, 35-44. doi:10.1029/2005GL022478.
- Marengo, J. (2004). Interdecadal variability and trends of rainfall across the Amazon basin. *Theoretical and Applied Climatology*, 79-96.
- Nobre, C. A., Marengo, J. A., & Artaxo, P. (2009). Understanding the Climate of Amazonia: Progress From LBA. *Amazonia and Global Change*, 145-148.
- Nobre, C. A., Obregón, G. O., Marengo, J. A., Fu, R. and Poveda, G. (2009) Characteristics of Amazonian Climate: Main Features, in Amazonia and Global Change (eds M. Keller, M. Bustamante, J. Gash and P. Silva Dias), American Geophysical Union, Washington, D. C.. doi: 10.1029/2009GM000903.
- Rockström, J., Steffen, W., Noone, y co-autores (2009). Planetary Boundaries: Exploring the safe Operating Space for Humanity. *Ecology and Society*, 14(2): 32. Retrieved from <http://archives.pdx.edu/ds/psu/8946>.
- Salazar, L. F., & Poveda, G. (2008). Interpretaciones físicas del escalamiento espacial de crecientes en la cuenca del río Amazonas. *XXIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica e Hidrología, IAHS, Cartagena de Indias, Colombia, Septiembre 2008*.
- Sen, P. K. (1968). Estimates of the regression coefficient based on Kendall's Tau. *American Statistical Association*, 1379-1389.
- World Resources Institute. (2015). *Global forest watch*. Recuperado el 18 de 06 de 2014, de <http://www.globalforestwatch.org/>
- Zhang, C. (2005). Madden-Julian Oscillation. *Reviews of Geophysics*, 43, doi:10.1029/2004RG000158.

