

EXPORTACIÓN DE SEDIMENTOS DESDE CUENCAS HIDROGRÁFICAS DE LA VERTIENTE ORIENTAL DEL GOLFO DE URABÁ: INFLUENCIAS CLIMÁTICAS Y ANTRÓPICAS

Andrea Arroyave-Rincón*

Juan F. Blanco**

Alexander Taborda***

Recibido: 15/12/2011

Aceptado: 21/05/2012

RESUMEN

En este artículo se analizaron series de tiempo mensuales de precipitación (mm), caudal (m^3/s) y exportación de sedimentos (kton/día) en cuencas de la vertiente oriental del golfo de Urabá. Se analizó la dinámica de la exportación de sedimentos, la relación caudal-exportación y caudal-precipitación. Se infirió el papel de fenómenos atmosféricos estacionales y multianuales (El Niño-Oscilación Sureña, ENOS), y factores antrópicos. Se encontraron variabilidades intra-anales significativas (ANOVA: $p < 0.001$) consistentes con las oscilaciones de la Zona de Convergencia Intertropical. Correlaciones de Pearson mostraron relaciones directas y significativas ($p < 0.001$). El ENOS no presentó influencia sobre la precipitación. Con aerofotografías se analizó el efecto antrópico en los municipios de Apartadó (1961-2005) y Chigorodó (1961-2007), y se encontró pérdida de cobertura boscosa del 90%. Las figuras de doble masa reflejaron, al cambiar la pendiente positivamente, a mediados de los 90, que la tasa de exportación de sedimentos fue mayor por metro cúbico de caudal, sugiriendo que hay un efecto antrópico.

Palabras clave: precipitación, caudal, exportación de sedimentos, estacionalidad, ENOS, deforestación.

* Bióloga, Universidad de Antioquia. E-mail: andrea.biora@gmail.com.

** Coordinador y profesor asociado, Programa de Posgrado en Biología. Instituto de Biología, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, U. de A. E-mail: blanco@exactas.udea.edu.co.

*** Profesor de cátedra, Instituto de Biología, Universidad de Antioquia. E-mail: alextaborda@gmail.com.

SEDIMENT EXPORTS FROM THE EASTERN BASIN IN THE GULF OF URABA: CLIMATIC AND ANTHROPOGENIC INFLUENCES

ABSTRACT

This article reports on a time-series analysis of monthly precipitation (mm), river discharge (m^3/s) and sediment export (kton/day) in Urabá Gulf. We analyzed the dynamics of sediment exports relative to river discharge, and the dynamics of this latter variable relative to precipitation. We inferred the role of seasonal and multi-annual atmospheric drivers, and anthropogenic factors. We found significant intra-annual variability (ANOVA: $p < 0.001$) consistent with the movement of the Inter-Tropical Convergence Zone. The Pearson correlation between variables showed direct and significant relationships ($p < 0.001$). The ENSO did not influence precipitation. Using aerial-photographs, we analyzed anthropogenic factors in the municipalities of Apartadó (1961-2005) and Chigorodó (1961-2007), finding up to a 90% forest-cover loss. Using double-mass graphs, it was observed an increase in slope steepness (during mid 90's), consistent with an increase in sediment export rate relative to discharge, thus suggesting that there was a significant effect of human factors, such as deforestation.

Key word: Precipitation, discharge, sediment exports, seasonality, ENSO, deforestation.

INTRODUCCIÓN

Comprender la dinámica de la exportación de sedimentos desde los ríos y quebradas hacia cuencas de mayor tamaño, aguas costeras, mares u océanos del mundo es uno de los objetivos más importantes en las ciencias de la tierra [1]. Por esto es urgente estudiar los procesos que intervienen en la exportación de sedimentos, tales como el régimen del caudal, el clima y las actividades antrópicas [1-3]. En primer lugar, es necesario entender que debido a que la exportación de sedimentos se expresa en términos de carga de sedimentos (*sediment load* = masa/tiempo), esta es el producto de la concentración de partículas sólidas que se mueven con el flujo del agua [1,3]. Por lo tanto, la exportación de sedimentos es determinada en gran medida por el régimen de caudal el cual, a su vez, está influenciado por las variaciones climáticas periódicas provocadas por fenómenos como la oscilación estacional de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) y la ocurrencia irregular del Fenómeno El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) [1]. De hecho, un significativo número de estudios reportan que en Suramérica, en general, y en Colombia, en particular, la hidroclimatología está influenciada naturalmente por las fases positiva y negativa del ENOS, que afecta la dinámica intra-anual y las magnitudes promedio de la precipitación y del caudal [4], las cuales tienen el potencial de afectar indirectamente la exportación o carga de sedimentos. En segundo lugar, la carga de sedimentos es la consecuencia del incremento de la masa de partículas sólidas por unidad de caudal, pero también del incremento de caudal con una masa constante de partículas, por lo cual, ha aumentado el interés por entender la contribución de factores antrópicos en ambos procesos [1, 5]. El remplazo antropogénico de la cobertura boscosa prístina por cultivos y potreros ha aumentado significativamente el transporte de sedimentos en las cuencas hidrográficas, ya que un aumento en la erosión del suelo aumenta la concentración de sedimentos suspendidos [5-8]. Sin embargo, el

caudal también se ha incrementado con la conversión de bosques a cultivos [8].

En los años ochenta y noventa se hicieron varios estudios que reportaron patrones naturales espaciales y temporales del transporte o exportación de sedimentos a escala global, y el papel fundamental de la precipitación y de la geomorfología [e. g. 9, 10]. Los estudios posteriores demostraron que el papel de las actividades antropogénicas eran igualmente importantes [5-7].

En Colombia, solo Restrepo [1] a finales de los noventa, empezó a estudiar sistemáticamente el comportamiento de los sedimentos en la cuenca del río Magdalena y concluye que este río tiene las tasas más altas de transporte de sedimentos ($143,9 \times 10^6 \text{ t año}^{-1}$) de toda la costa oriental de Suramérica, y sugiere, además, que estas pueden estar fuertemente influenciadas por los cambios en el uso de la tierra y por la variación temporal de la precipitación. Paralelamente con sus estudios en el río Magdalena acumuló evidencias de otras cuencas del Caribe, y mencionó que los ríos de las cuencas costeras que drenan hacia el golfo de Urabá desde la serranía de Abibe tienen altas tasas de producción de sedimentos [1, 11]. Recientemente, Montoya y Montoya [12], en su análisis de la exportación de sedimentos en diferentes cuencas antioqueñas, también resaltaron las altas cargas de sedimentos de varios ríos de la cuenca del golfo de Urabá (León: 2,177 kton/día; Carepa: 0,674 kton/día; Apartadó: 0,142 kton/día), y las atribuyeron principalmente a la magnitud del caudal, aunque no descartaron la influencia de factores climáticos (precipitación), geológicos (suelos aluviales) y antrópicos (conversión de bosques a pastos y cultivos). Aunque los ríos de la cuenca del golfo de Urabá reciben más precipitación y escorrentía que la mayoría de los ríos de la cuenca del Caribe colombiano, y esto explica parcialmente las altas cargas y producciones de sedimentos [1], trabajos recientes sugieren que el predominio del monocultivo de banano y plátano puede tener un papel más importante en dichos procesos [13, 14].

En el presente documento se explora el papel de la actividad antropogénica en la exportación de sedimentos en siete cuencas hidrográficas de la vertiente oriental del golfo de Urabá caracterizadas por el aprovechamiento agropecuario de sus suelos [13, 14]. Este estudio aborda las siguientes preguntas: 1) ¿cuál es la magnitud de la relación entre las dinámicas del caudal y de la exportación de sedimentos hacia el Golfo por algunos de sus principales tributarios?, 2) ¿responde la exportación de sedimentos a factores climáticos como la oscilación estacional de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) y los fenómenos El Niño y La Niña?, 3) ¿cuál ha sido la magnitud de la expansión de los cultivos de banano y plátano y de los potreros en la planicie costera de Urabá?, y 4) ¿Puede esta explicar las altas tasas de exportación de sedimentos?

1 MATERIALES Y MÉTODOS

1.1 Área de estudio

Este estudio se realizó en el golfo de Urabá, el cual se encuentra ubicado en el extremo suroccidental del mar Caribe colombiano. Su franja costera mide aproximadamente 543 km de borde litoral que corresponden a los departamentos de Antioquia y Chocó (Urabá antioqueño y Urabá chocono). El Urabá antioqueño ocupa el 83% del litoral total del golfo, al extenderse 453 km sobre el costado sur y oriental. Presenta un clima húmedo tropical y se encuentra ubicado en la franja de baja presión llamada Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT). En el golfo se da un período de lluvia entre mayo y noviembre (>250 mm/mes) y un período seco desde diciembre hasta mediados de abril (<100 mm/mes) con algunos periodos de transición [13].

La cuenca de Urabá está incluida tectónicamente en el terreno Sinú-San Jacinto y litológicamente está conformada por sedimentitas cuya edad

está comprendida entre el Oligoceno y el Plioceno [15], períodos pertenecientes al Cuaternario, que son los depósitos más recientes y dan origen a las arenas gruesas y finas, arcillas, calizas, gravas y limos, que en su mayoría conforman los sedimentos de las planicies de las cuencas hidrográficas del golfo oriental [15, 16], lo que puede facilitar una mayor erosión, y proporcionar mayor cantidad de sedimentos a los ríos.

1.2 Estaciones estudiadas

Para este estudio se escogieron siete cuencas hidrográficas (Mulatos, Turbo, Apartadó, Carepa, Vijagual, Chigorodó y León) de la vertiente oriental del golfo de Urabá y Caribe antioqueño (anexo A). Se recopilieron series de tiempo de estaciones pluviométricas y limnigráficas del Instituto Colombiano de Meteorología e Hidrología (IDEAM): precipitación (mm) (25 años para cada cuenca, aproximadamente), caudales (m^3/s) (~ 27 años), transporte (=exportación) diario de materiales en suspensión (kton/día) para el río Turbo (9 años) y concentración media diaria de sedimentos en suspensión (kg/m^3) (~ 20 años) para las demás cuencas. La variable concentración media diaria de sedimentos en suspensión (kg/m^3) fue transformada en exportación o transporte de sedimentos (kton/día). Para efectos de este trabajo se toman como sinónimos exportación, transporte y carga de sedimentos (*sediment load*).

1.3 Análisis estadísticos: análisis hidrológicos y climatológicos

Para lograr identificar dinámicas, tendencias y ciclos temporales intra-anales, se realizaron análisis de varianza (ANOVA) de una vía, con un 95% de confianza y gráficas de cajas y bigotes. Se utilizaron los paquetes estadísticos SPSS versión 19 (IBM SPSS Statistics 19, 2011) y Minitab versión 16 (Statistical Software, Ink. 2010). Se analizó la relación entre la exportación de sedimentos y el cau-

dal mediante regresiones lineales, y se hallaron los coeficientes de determinación (r^2) y de correlación de Pearson (r), con un 95% de confianza. Con el fin de establecer, a su vez, la influencia de la precipitación sobre la dinámica del caudal se realizó un análisis de regresión lineal. Las series de tiempo de ambas variables se graficaron simultáneamente en gráficas de ejes dobles en Y, y en estas gráficas se identificaron los años en que se presentaron anomalías positivas (La Niña; en color azul) y negativas (El Niño; en color rojo) del Índice de Oscilación del Sur (IOS) [17]. También se identificaron los años de transición y los normales. Finalmente, se realizaron regresiones lineales entre la precipitación de cada río y el IOS [17], con el fin de analizar el efecto de los eventos El Niño y de La Niña.

1.4 Efectos antrópicos: Cambio en el uso del suelo

Se estimó la tasa de cambio en el uso del suelo de bosque nativo a otras coberturas, por medio de la interpretación de aerofotografías de las cuencas del río Apartadó (1961 y 2005) y del río Chigorodó (1961 y 2007). Las imágenes del año 1961 fueron obtenidas del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) y las imágenes de 2005 y 2007 del Departamento de Planeación del departamento de Antioquia. Las categorías de la cubierta y del uso de la tierra fueron interpretadas y polígono-delineadas con el programa ArcGis versión 9,3 (Desktop Administration, Ink. ArcGIS Configuration Manager, 2011). Se computaron las áreas y el porcentaje de área en cada año y se estableció la tasa de deforestación anual de bosque.

Para analizar si el incremento en la exportación de sedimentos se encuentra influenciado por factores antrópicos, se elaboraron gráficas de dispersión de doble masa (caudal acumulado y exportación acumulada de sedimentos) en donde las tendencias no lineales de cada variable indican si los factores

antrópicos influyen en el cambio de la pendiente del gráfico de doble masa [1, 7]. Las gráficas fueron ajustadas con ecuaciones lineales en cada uno de los períodos de corte de estas, utilizando el paquete estadístico SigmaPlot versión 11. (Systat Software, Inc. SigmaPlot for Windows, 2010).

2 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

2.1 Variabilidad estacional

Los análisis de varianza de una vía (ANOVA) (tabla 1) mostraron una variación intra-anual significativa, con una estacionalidad marcada para las tres variables analizadas (precipitación, caudal y exportación de sedimentos). Hubo diferencias significativas entre los períodos enero-marzo y abril-diciembre, al presentarse valores bajos durante el primero y altos durante el segundo, lo que es consistente con la estacionalidad monomodal pluvial (figura 1), reportada para la región de Urabá asociada con las oscilaciones de la ZCIT [14, 15]. Sin embargo, la precipitación promedio no presentó diferencias significativas en algunas de las estaciones debido a que se presentaron valores altos, aun durante el período de menor precipitación. Por lo tanto, la mayor estacionalidad se produce con los valores mínimos. Durante la época lluviosa (mayo-noviembre) los vientos alisios del sudeste, que entran al país por la costa chochoana, son dirigidos por la cuenca del río Atrato en dirección sur-norte hacia el golfo de Urabá, provocando un aumento en la precipitación. En época seca la ZCIT se desplaza hacia el Ecuador en una posición septentrional en el océano Pacífico desde finales de diciembre hasta principios de abril ocasionando baja precipitación. Sin embargo, el clima de la región no puede considerarse monzonal o marítimo debido a que existen fenómenos de escala regional (e. g. Chorro del Chocó) que ocasionan altas precipitaciones, aun durante la época seca.

Tabla 1. Análisis de Varianza (ANOVA) de una vía para establecer la variabilidad intra-anual de la precipitación, el caudal y la exportación de sedimentos mensuales en las cuencas estudiadas. Se muestran además las estaciones y series de tiempo. G. L.: grados de libertad (n-1), F: Prueba F-Fisher y P: valor de probabilidad.

| Cuenca | Estación | Variable | Series de tiempo | G.L. | F | P |
|-----------|----------------|---------------------------|---|------|-------|-------|
| Mulatos | Turbo | Precipitación | 1983-2010 | 273 | 0,768 | 0,792 |
| | Turbo | Caudal | 1977-2009 | 356 | 1,583 | 0,026 |
| | Necoclí | Exportación de sedimentos | 1984-1993; 1995-1996 | 238 | 1,969 | 0,042 |
| Turbo | Turbo | Precipitación | 1984-2007; 2009 | 275 | 1,284 | 0,173 |
| | El Dos | Caudal | 1987-2008 | 234 | 6,262 | 0,001 |
| | El Dos | Exportación de sedimentos | 1990-1999 | 103 | 2,843 | 0,005 |
| Apartadó | El Casco | Precipitación | 1985-2009 | 275 | 1,289 | 0,169 |
| | Apartadó | Caudal | 1985-2009 | 279 | 6,751 | 0,001 |
| | Apartadó | Exportación de sedimentos | 1978-1981; 1985-1988; 1990; 1993; 1995-2009 | 186 | 3,531 | 0,001 |
| Carepa | Carepa | Precipitación | 1983-2010 | 305 | 0,953 | 0,537 |
| | Carepa | Caudal | 1978-1993; 1995-2007 | 338 | 5,082 | 0,001 |
| | Carepa | Exportación de sedimentos | 1977-2008 | 239 | 2,443 | 0,001 |
| Vijagual | Carepa | Precipitación | 1983-2010 | 294 | 0,983 | 0,493 |
| | Apartadó | Caudal | 1977-1996 | 212 | 7,227 | 0,001 |
| | Apartadó | Exportación de sedimentos | 1978-1980; 1984-1996 | 112 | 2,635 | 0,002 |
| Chigorodó | La Palmera | Precipitación | 1991-2008 | 193 | 2,346 | 0,003 |
| | Chigorodó | Caudal | 1977-2009 | 352 | 3,562 | 0,001 |
| | Chigorodó | Exportación de sedimentos | 1983-1988; 1992; 1993; 1995-2007 | 180 | 2,089 | 0,007 |
| León | Barranquillita | Precipitación | 1985-2009 | 275 | 1,606 | 0,003 |
| | Barranquillita | Caudal | 1977-2009 | 356 | 1,704 | 0,001 |
| | Barranquillita | Exportación de sedimentos | 1978-1993; 1995-1996; 1998-2007 | 238 | 1,868 | 0,009 |

Fuente: elaboración propia

Tabla 2. Áreas de municipio de estudio, años, área total (km²), área bosque, otras coberturas y conversión de bosques (%) y tasa de deforestación anual (%).

| Municipio | Año | Área total (km ²) | Área bosque (km ²) | Área otras coberturas (km ²) | Bosque actual (%) | Bosque perdido (%) | Tasa deforestación anual (%) |
|-----------------|------|-------------------------------|--------------------------------|--|-------------------|--------------------|------------------------------|
| Apartadó | 1961 | 6,2 | 6,0 | 0,2 | | | |
| | 2005 | 6,2 | 3,5 | 2,7 | 62,4 | 37,6 | 0,86 |
| Sur de Apartadó | 1961 | 6,2 | 5,7 | 0,6 | | | |
| | 2005 | 6,2 | 2,3 | 3,9 | 38,5 | 61,5 | 1,39 |
| Chigorodó | 1961 | 25 | 13,2 | 11,8 | | | |
| | 2007 | 25 | 1,3 | 23,7 | 9,5 | 90,5 | 1,97 |

Fuente: elaboración propia

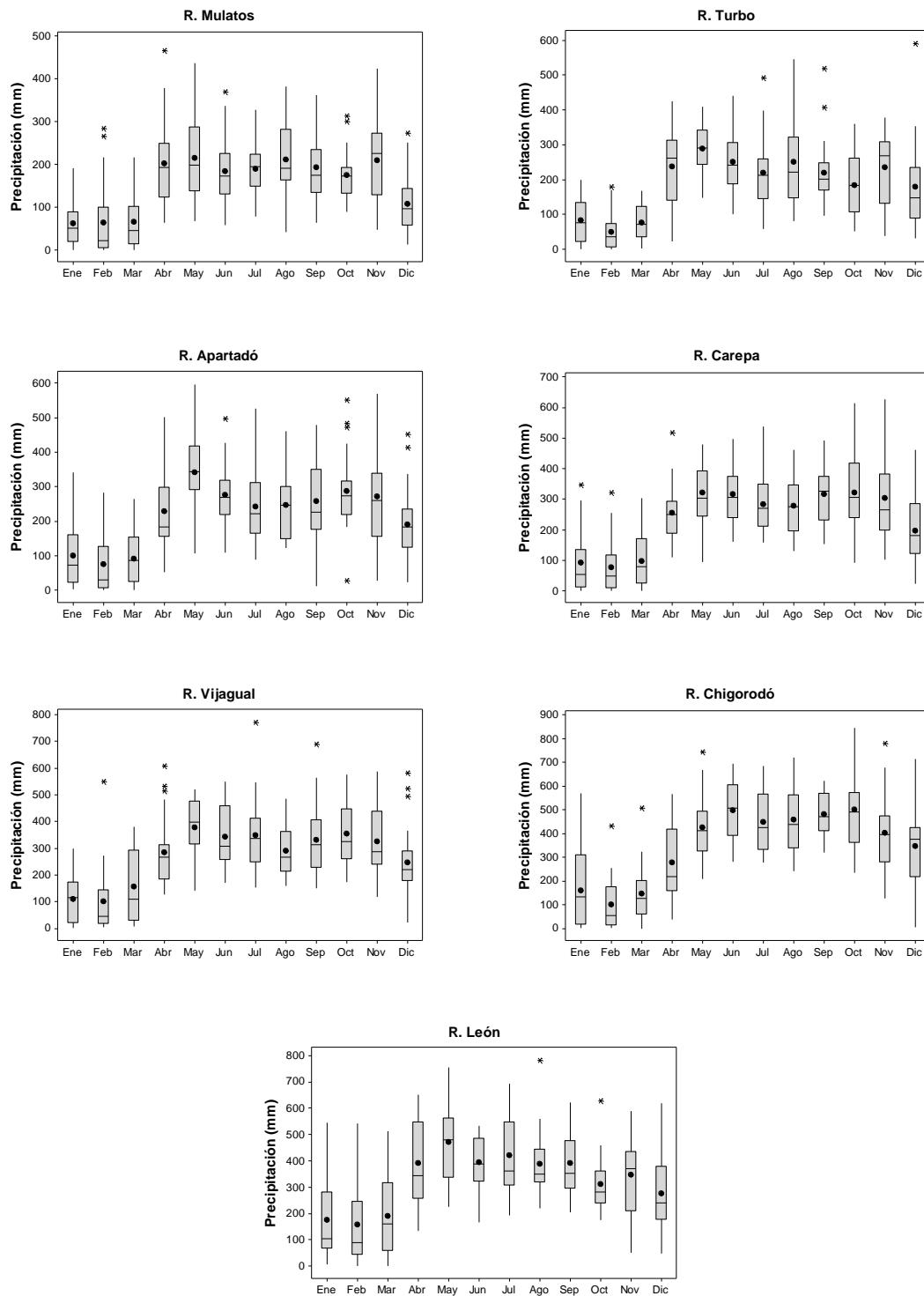


Figura 1. Variabilidad intra-anual de la precipitación (mm) en las cuencas de los ríos Mulatos, Turbo, Apartadó, Carepa, Vijagual, Chigorodó y León. Obsérvese el patrón monomodal. Se indican las medias, los valores máximos y mínimos con un intervalo de confianza del 95%.

Fuente: elaboración propia

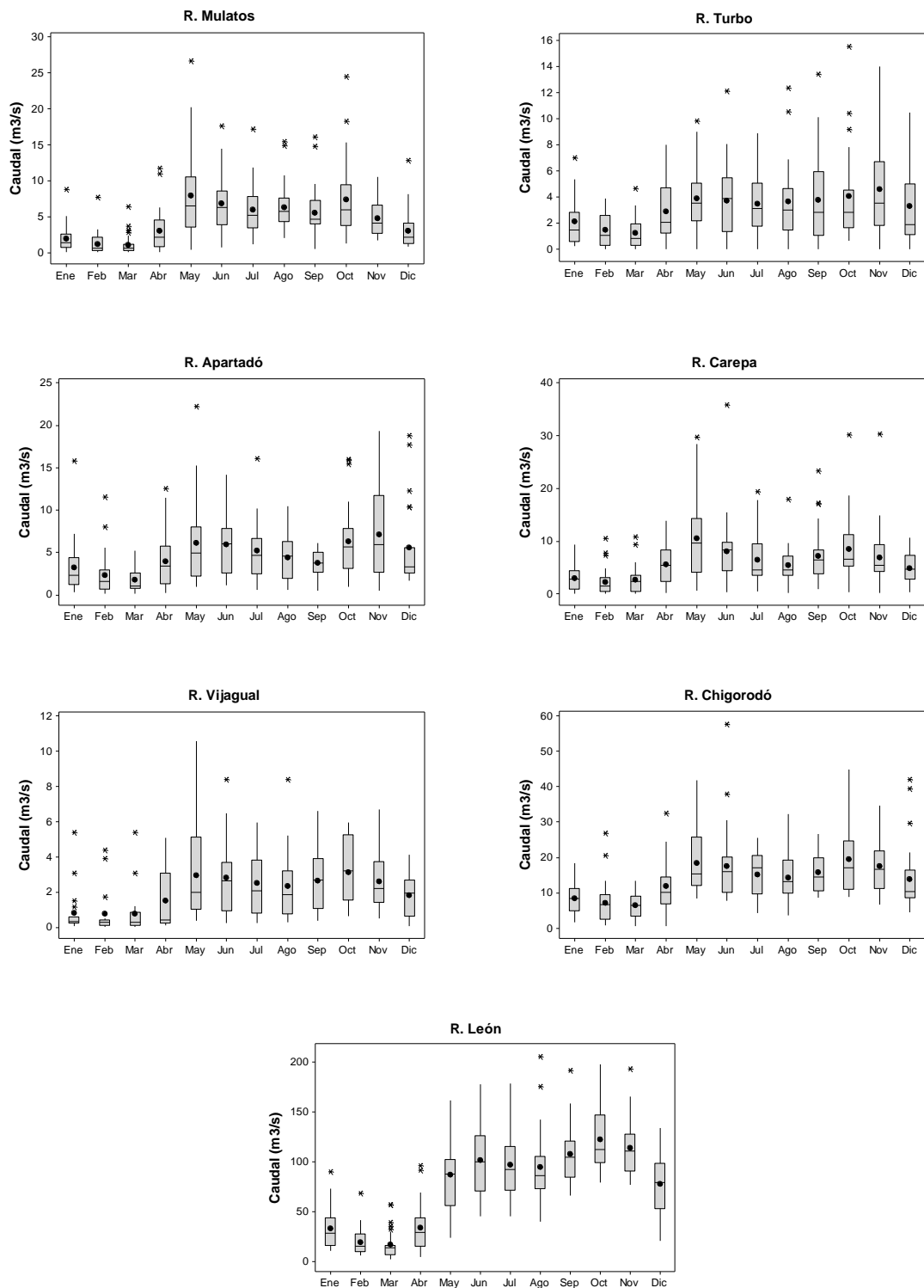


Figura 2. Variabilidad intra-anual del caudal (m³/s) en las cuencas de los ríos Mulatos, Turbo, Apartadó, Carepa, Vijagual, Chigorodó y León. Se indican las medias, los valores máximos y mínimos, y el intervalo de confianza del 95%.

Fuente: elaboración propia

El caudal promedio mensual mostró un patrón de variación estacional influenciado por la precipitación en todas las estaciones (figura 2). Sin embargo, solo en los ríos Mulatos, Chigorodó y León se observó una estacionalidad monomodal marcada en los caudales mínimos, mientras que en los otros ríos el caudal fue altamente variable durante la época de lluvias, aunque consistentemente se observaron las mayores crecientes. Como patrón general, se observó que una vez iniciada la época de lluvias el caudal promedio permanece alto pero la ocurrencia de crecientes es errática e igualmente probable durante todos los meses, aparentemente afectada por factores diferentes a la precipitación mensual total, como se explicará en la siguiente sección.

La exportación de sedimentos presentó una dinámica intra-anual similar a la del caudal, marcadamente estacional, observándose dos períodos discretos (baja exportación: enero-abril; alta exportación: mayo-diciembre) (figura 3). La extensión del período de baja exportación hasta abril sugiere que se requiere una saturación del suelo de las cuencas y un incremento significativo de la escorrentía antes de observar un aumento significativo de la concentración de sedimentos suspendidos en los ríos [3]. Finalmente, se observó que aunque los valores promedio de exportación de sedimentos son consistentes con el incremento de precipitación y caudal durante la época de lluvias, existe una igual probabilidad de ocurrencia de valores máximos a lo largo de toda la época, que no son consistentes con los de las otras variables, pues sugieren la influencia de factores adicionales a los hidrológicos. Esto cuestiona la asunción tradicional de que la exportación de sedimentos y caudal incrementa en la misma proporción y sigue la dinámica intra-anual de la precipitación tal como se ha establecido en diferentes ríos del mundo [5], de Colombia [1, 10] y de Antioquia [1, 12].

2.2 Relación entre exportación de sedimentos y caudal

La exportación de sedimentos varió directa y significativamente con respecto al caudal en todos los ríos (figura 4); sin embargo, el porcentaje de varianza explicada fue bajo en todos los casos. Esto debido a que hubo niveles de exportación de sedimentos altos en algunos momentos de caudales bajos. Los mayores porcentajes se presentaron en los ríos Mulatos y Vijagual (r^2 : 50 y 57%, respectivamente), pero en los ríos con mayor cobertura de potreros (Chigorodó: 29%) o de cultivos de plátano y banano (Turbo: 24%, Apartadó: 28%, Carepa 2%) fueron significativamente menores. Nótese el caso particular de Carepa, el mayor distrito bananero de Urabá en donde la alta exportación no se explica por la hidrología de la cuenca [12, 13]. La estación Barranquillita en la parte más baja del río León, que recibe los tributarios que atraviesan la zona ganadera y bananera, y por lo tanto, integra la condición de toda la cuenca, presentó una varianza explicada de 32%, lo que sugiere que la exportación de sedimentos es explicada en >68% por otros factores tales como eventos antrópicos episódicos, y fenómenos atmosféricos de ocurrencia irregular. Otros factores que pueden influir en tal comportamiento son la actividad tectónica de las cuencas y la frágil litología de la región (conformada principalmente por arcillolitas y areniscas) [16], los que hacen que las laderas y los suelos sean fácilmente transportados por acción de la escorrentia superficial y movimientos en masa que ocurren durante alta o baja precipitación, introduciendo altas cargas de sedimentos al sistema. Es importante comprender que las cuencas con pequeñas áreas de drenaje y altas pendientes, como estas que nacen en la Serranía de Abibe, presentan una alta variabilidad inter-anual en los flujos de agua y sedimentos, ya que presentan en sus series de tiempo valores extremos con respecto al promedio interanual, mostrando que exportan gran cantidad de sedimentos en cortos períodos de tiempo, tal

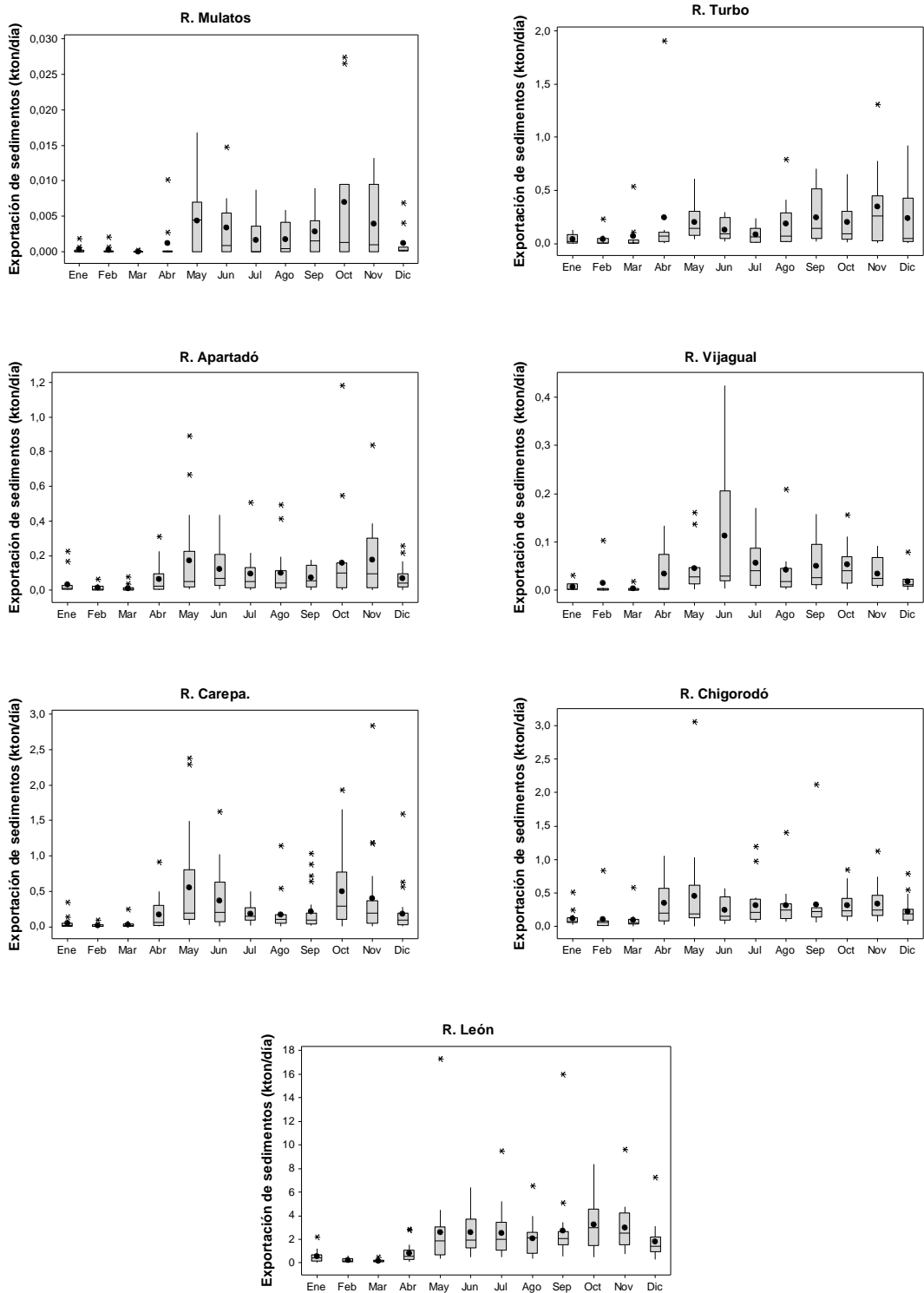


Figura 3. Variabilidad intra-anual de la exportación de sedimentos (kton/día) en las cuencas de los ríos Mulatos, Turbo, Apartadó, Carepa, Vijagual, Chigorodó y León. Se indican las medias, los valores máximos y mínimos, y el intervalo de confianza del 95%.

Fuente: elaboración propia

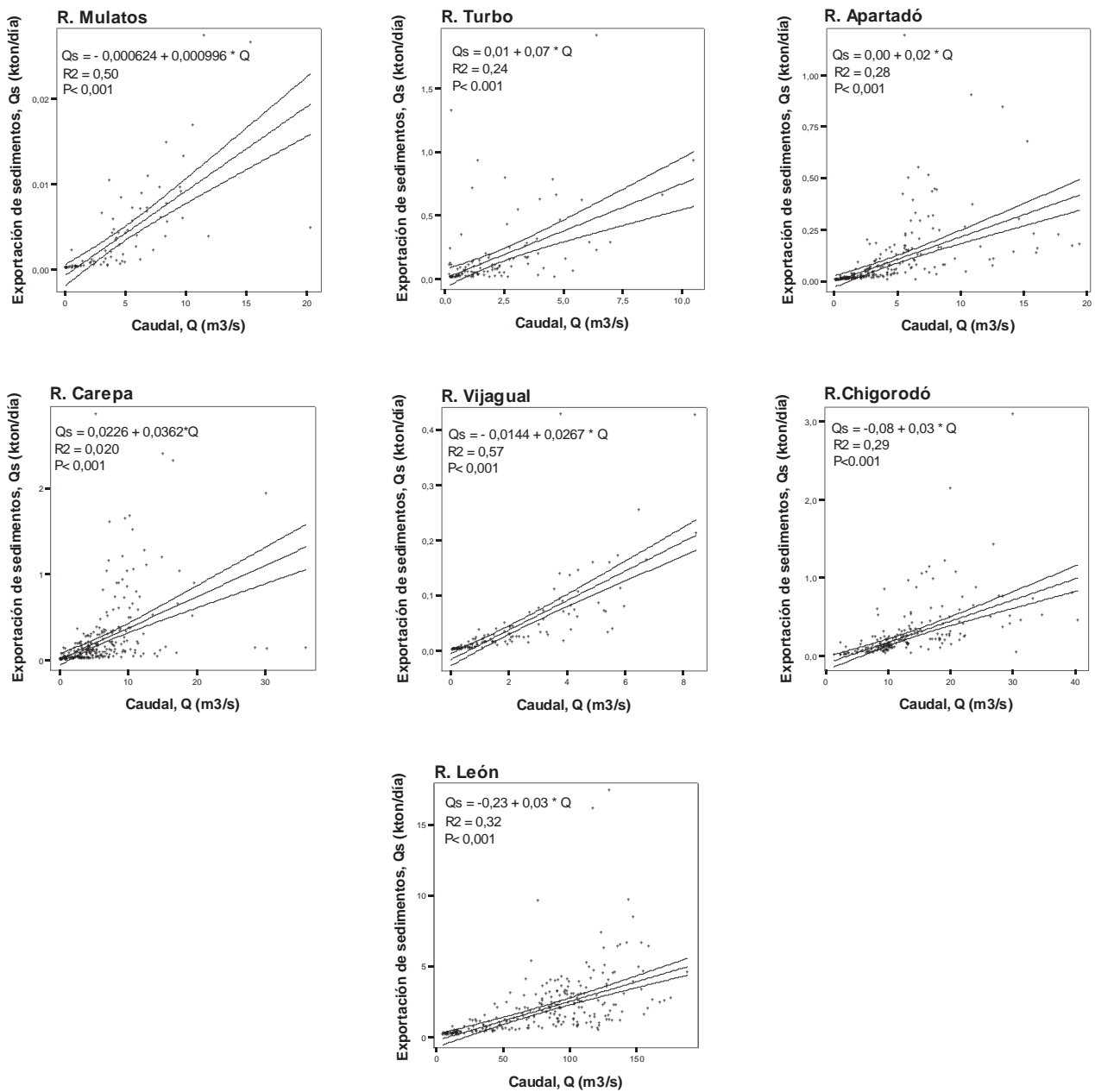


Figura 4. Regresión lineal entre la exportación de sedimentos y el caudal de los ríos Mulatos, Turbo, Apartado, Carepa, Vijagual, Chigorodó y León. Se muestra la ecuación, los coeficientes de determinación (R^2) y de correlación de Pearson

Fuente: elaboración propia

como se ha reportado para otras microcuencas montañosas tributarias del río Magdalena y otras zonas tropicales [1, 9, 10].

2.3 Influencia de El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) sobre la dinámica inter-anual de la precipitación y del caudal

El caudal presentó una correlación positiva y significativa con la precipitación mensual a lo largo de las series de tiempo y todos los ríos (figura 5). Sin embargo, las pendientes mostraron, que la magnitud de cambio del caudal con relación a la precipitación es baja, al igual que el R^2 (baja varianza explicada <30%) posiblemente debido a factores antrópicos (baja cobertura vegetal) y naturales como la litología y las características físicas de las cuencas, lo que puede provocar altos caudales aun durante la época de baja precipitación. Los ríos de esta región incluidos en el análisis se podrían clasificar como de régimen torrencial (*flashy hydrographs*), ya que mantienen un caudal base (*base flow*) relativamente constante y bajo, pero se presentan crecientes repentinas y episódicas que tienen una alta probabilidad de ocurrencia durante toda la época de lluvias. Por lo tanto, la precipitación solo explica los caudales de creciente pero no los caudales menores, los cuales podrían estar afectados por actividades antropogénicas como las tomas de agua [3].

Por otro lado, la precipitación total anual en las cuencas estudiadas en la región de Urabá no mostró una influencia significativa del IOS ($R^2 < 4\%$) (figura 5). Esto puede ser debido a la ubicación geográfica del golfo, que la hace sensible a fenómenos episódicos de mesoescala, provenientes del Caribe, y a la corriente de Chorro del Chocó, proveniente del Pacífico, además de sistemas de circulación local costa-montaña influenciados por las serranías del Darién y de Abibe. Nuestros resultados son contrarios a lo observado en el resto del Caribe y del Pacífico colombiano donde existe

una influencia altamente significativa del ENOS sobre la precipitación y el caudal de los ríos [1, 11].

2.4 Efectos antrópicos

Las tasas de deforestación anual en las áreas fotointerpretadas en el municipio de Apartadó fueron 0,85 y 1,39 % para el período comprendido entre 1961 y 2005 (figura 6). La tasa de deforestación anual fue 1,9 %, entre 1961 y 2007 para el área fotointerpretada en el municipio de Chigorodó. Estas tasas son altas en el contexto de Suramérica (rango: 1,5-4,5 % anual para el período 1940-2000) [18], y de la zona andina en la cuenca del río Magdalena (promedio: 1,9 % anual para el período 1970-1990) [1]. De ser estas tasas consistentemente altas en toda la región de Urabá, podría ser uno de los puntos calientes de deforestación más importantes en el panorama latinoamericano.

Esta deforestación se debe en gran medida al desarrollo ganadero (como en el caso de Chigorodó) y agrícola (como en el caso de Apartadó), el cual se ha basado principalmente en el cultivo de grandes extensiones de banano y plátano, cubriendo cerca el 73% del área total del Golfo [13, 14]. Recientemente, para la cuenca baja del río Turbo se cuantificó que la siembra de extensos cultivos de plátano y banano ocasionó la deforestación de 71,3 ha de bosques naturales, y la conversión de 286,2 ha de pastos, en los últimos 40 años [19].

En las figuras de doble masa del caudal acumulado y la exportación acumulada de sedimentos, la pendiente no fue lineal y se presentaron dos cortes o puntos de inflexión en la línea de regresión, que formaron tres pendientes diferentes, que sugieren tres períodos con tendencias diferentes de exportación de sedimentos (figura 7). Estos resultados indican que hubo períodos cuando la tasa de la exportación de sedimentos fue mayor que la tasa de salida de cada metro cúbico del caudal en cada afluente del golfo de Urabá. Este alejamiento de las pendientes generales se observa desde mediados

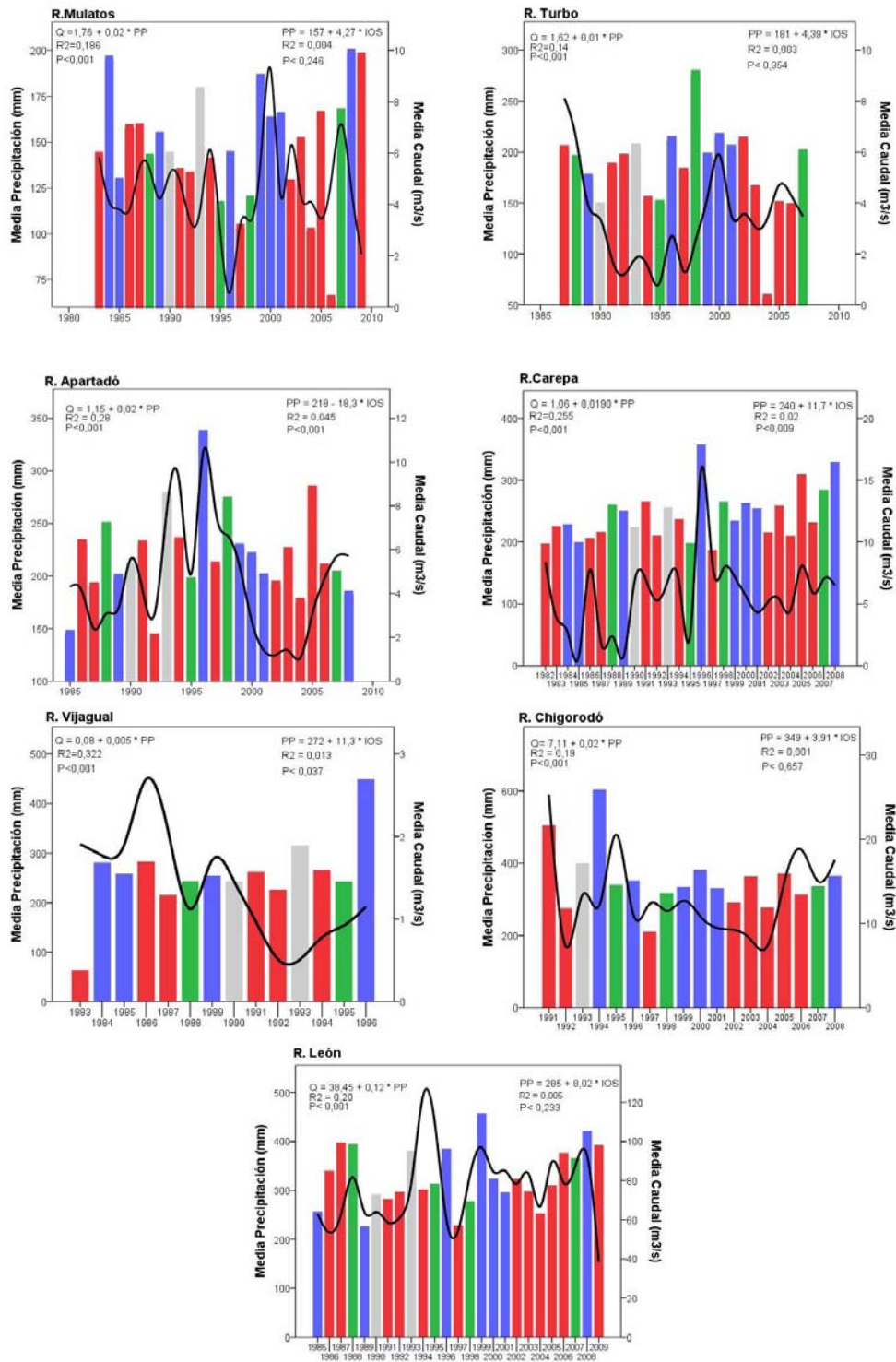
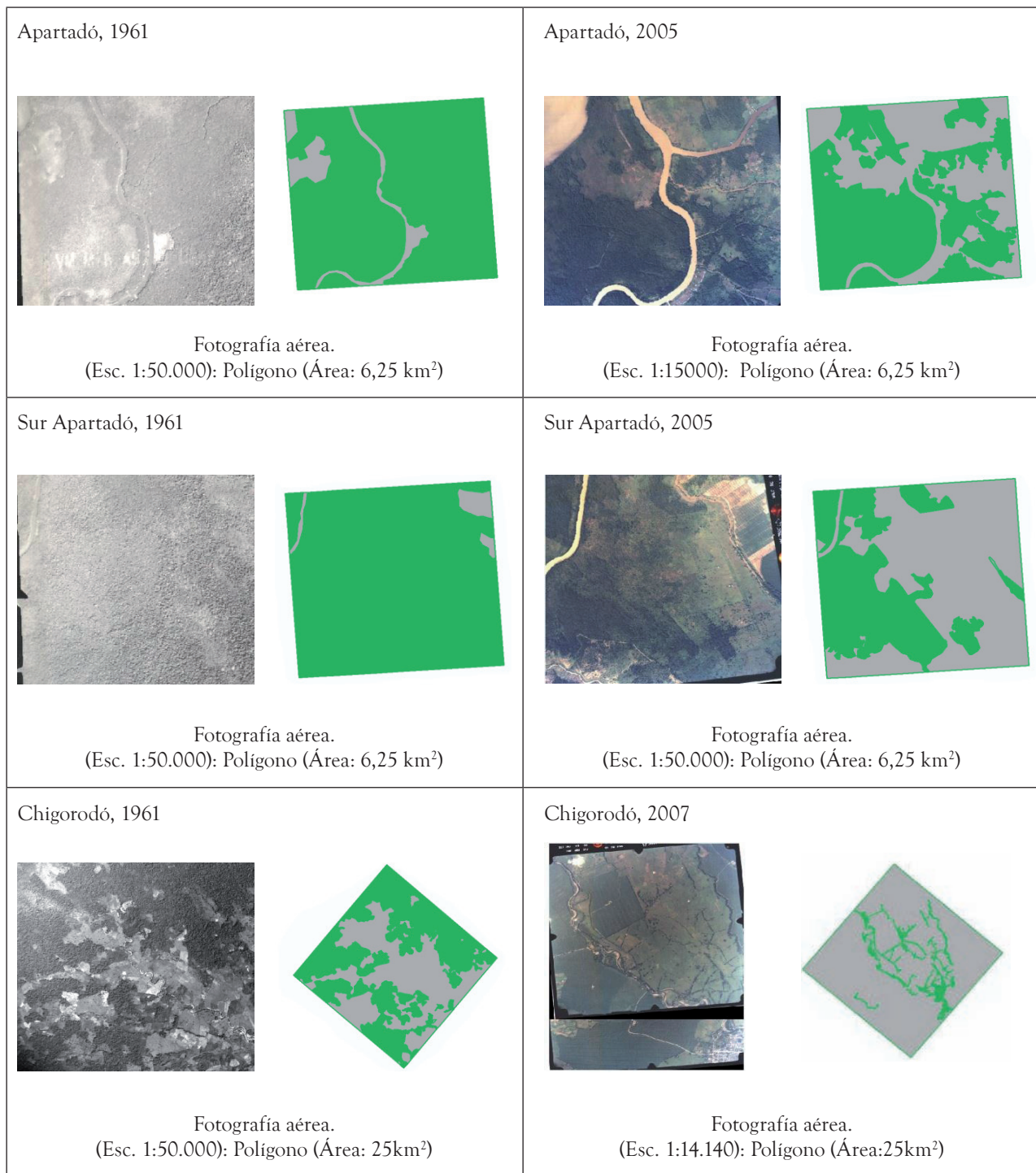


Figura 5. Dinámica multianual de la precipitación total (PP, barras) y del caudal medio (Q, líneas) en las cuencas de los ríos Mulatos, Turbo, Apartadó, Carepa, Vijagal, Chigorodó y León. Los colores representan la ocurrencia de las diferentes fases del ENOS, así: Azul= La Niña, Rojo= El Niño, Verde = año de transición Niño-Niña, Gris = año normal. Se presentan la ecuación de regresión, R2, y el valor de probabilidad del coeficiente de Pearson para las regresiones PP-Q y PP-IOS. Fuente: elaboración propia



Imágenes del AÑO 1961, Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC); Imágenes del 2005 y 2007, CATASTRO Departamental de Antioquia.

Figura 6. Fotografías aéreas de los Municipios de Apartadó y Chigorodó con sus respectivos polígonos para los años 1961,2005 y 2007. Verde: Área de Bosque; Gris: Otras coberturas.

Fuente: elaboración propia

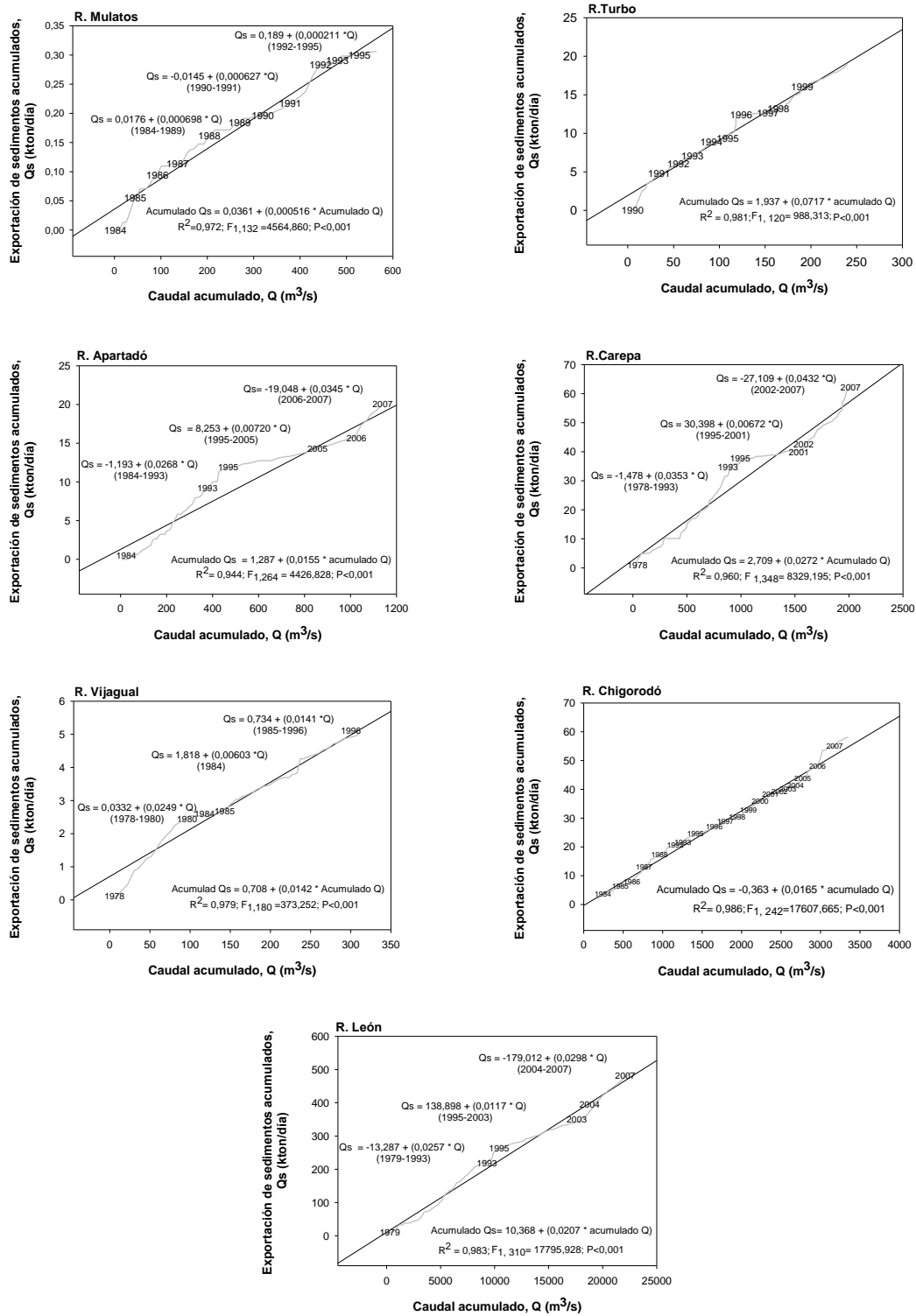


Figura 7. Gráficas de doble masa entre los valores acumulados del caudal y de la exportación de sedimentos. Se muestra la tendencia de la exportación en relación al caudal en las cuencas de los ríos Mulatos, Turbo, Apartadó, Carepa, Vijagal, Chigorodó y León. Se incluye, además, la ecuación lineal, para regresión general y para cada uno de los períodos identificados.

Fuente: elaboración propia

de los años 80 y 90, épocas en que el desarrollo de la industria bananera tuvo su apogeo y se implementaron políticas de fomento a la exportación del banano y a la tecnificación de la agroindustria [13, 19].

3 CONCLUSIÓN

Los factores antrópicos como la deforestación ejercen la mayor influencia sobre las magnitudes y dinámicas del caudal y de la exportación de sedimentos de ríos tributarios de la parte oriental del golfo de Urabá. Esto debido a que se encontraron altas tasas de deforestación anual durante la segunda mitad del siglo XX, a que históricamente se ha incrementado la tasa de exportación de sedimentos por unidad de caudal y a que, en general, existe una baja correlación entre la precipitación y el caudal, y entre el caudal y la exportación de sedimentos. Finalmente, no se encontró una influencia significativa del ENOS sobre la precipitación anual en las estaciones analizadas en la región. Sin embargo, se recomienda realizar un análisis más riguroso con la precipitación mensual.

4 AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad de Antioquia, a la Corporación Académica Ambiental de la Universidad de Antioquia, y a la Corporación para el Desarrollo Sostenible del Urabá, CORPOURABA, con los cuales se realizó el convenio 038/2009, para la ejecución del proyecto "Impactos de la sedimentación sobre la estructura trófica macrobentónica e íctica y el procesamiento de la hojarasca del manglar en el delta del río Turbo, golfo de Urabá, Caribe colombiano", de donde se derivó esta investigación. Se agradece especialmente a Edgar Andrés Estrada por su apoyo durante la realización de los análisis de las aerofotografías y a Alberto Vivas y Jairo Guillermo por la cesión de datos y de información valiosa para la realización de este estudio.

REFERENCIAS

- [1] J. D. Restrepo, Sedimentos del río Magdalena: Reflejo de la crisis ambiental, Medellín: Fondo editorial Universidad de EAFIT, 2005, 267 p.
- [2] K. Richards, Rivers: form and process in alluvial channels, Caldwell, New Jersey: The Blackburn Press, 2004, 360 p.
- [3] P. E. Black, Watershed Hydrology, 2 ed., Syracuse, New York: CRC Press, 1996, 460 p.
- [4] G. Poveda et al., "Seasonality in ENSO-related precipitation, river discharges, soil moisture, and vegetation index in Colombia," *Water resources research*, vol. 37, no. 8, pp. 2169-2178, 2001.
- [5] J. Syvitski, y D. Milliman, "Geology, Geography, and Humans Battle for Dominance over the Delivery of Fluvial Sediment to the Coastal Ocean," *The Journal of Geology*, vol. 115, pp. 1-19, 2007.
- [6] D. E. Walling, "Linking land use, erosion and sediment yields in river basins," *Hydrobiologia*, vol. 410, pp. 223-240, 1999.
- [7] D. E. Walling, y D. Fang, "Recent trends in the suspended sediment loads of the world's rivers," *Global and Planetary Change*, vol. 39, pp. 111-126, 2003.
- [8] M. Meybeck et al., "Global variability of daily total suspended solids and their fluxes in rivers," *Global and Planetary Change*, vol. 39, pp. 65-93, 2003.
- [9] J. Milliman, y R. Meade, "World-wide delivery of river sediment to the oceans," *Journal of Geology*, vol. 91, pp. 1-21, 1983.
- [10] J. Milliman, y J. Syvitski, "Geomorphic/Tectonic Control of Sediment Discharge to the Ocean: The Importance of Small Mountainous Rivers," *Journal of Geology*, vol. 100, no. 5, pp. 525-544, 1992.
- [11] J. D. Restrepo, y B. Kjerfve, "River discharge, sediment load, and sediment yield estimates for the Magdalena River and other Caribbean rivers of Colombia: environmental implications," en *CariBas – Activities in River Catchments and their Impacts on Coastal Systems in the Caribbean*, LOICZ-IGBP Report 23, B. Kjerfve et al., eds., 2002.

- [12] L. J. Montoya, y R. Montoya, "Transporte de sedimentos en las corrientes del departamento de Antioquia," *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, vol. 4, no. 7, pp. 101-109, 2005.
- [13] J. Blanco, "Banana Crop Expansion and Increased River-borne Sediment Exports to the Gulf of Urabá, Caribbean coast of Colombia," *Ambio*, vol. 38, pp. 2-6, 2009.
- [14] C. García-Valencia et al., *Atlas del golfo de Urabá: una mirada al Caribe de Antioquia y Chocó, Santa Marta: Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras -Inve-mar-*, 2007, 180 p.
- [15] M. Hermelin, *Geografía de Antioquia*, Medellín: Fondo editorial Universidad EAFIT, 2006, 338 p.
- [16] Instituto Geográfico Agustín Codazzi, "Investigación integral del Andén Pacífico Colombiano," [CD-ROM], Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), Instituto Colombiano de Geología y Minas (INGEOMINAS), CD 1 Geología, mapas, 2001.
- [17] National Weather Service, y National Oceanic and Atmospheric Administration. "National Weather Service Climate Prediction Center, Southern Oscillation Index (SOI)," [En línea], acceso noviembre 2011; Disponible: <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/indices/>, 2011.
- [18] A. Etter et al., "Modelling the conversion of Colombian lowland ecosystems since 1940: Drivers, patterns and rates," *Journal of Environmental Management*, vol. 79, pp. 74-87, 2006.
- [19] A. Taborda, *Cambios de la cobertura del suelo en la cuenca baja del río Turbo entre 1960 y 2007, departamento de Antioquia, golfo de Urabá, Caribe Colombiano*, Reporte técnico, CORPOURABÁ, Turbo, 2008.

ANEXO

Anexo A. Información recopilada de cada una de las series de tiempo obtenidas del Instituto Colombiano de Meteorología e Hidrología (IDEAM), para las cuencas de los ríos Mulatos, Turbo, Apartado, Carepa, Vijagual, Chigorodó y León.

| Cuenca | Municipio | Estación (Código) | Año | Nombre variable original | Unidades | Tipo estación |
|-----------|-----------|--------------------------|--|--|-------------------|----------------------------------|
| Mulatos | Turbo | El Mellito (1202503) | 1983-2010 | Valores totales diarios de precipitación | mm | Estación climatológica ordinaria |
| Mulatos | Turbo | Pueblo Bello (1202701) | 1977-2009 | Valores medios diarios de caudales | m ³ /s | Limnimétrica |
| Mulatos | Necoclí | Pueblo Bello (1202701) | 1984-1993; 1995-1996 | Concentración media diaria de sedimentos en suspensión | kg/m ³ | Limnimétrica |
| Turbo | Turbo | Turbo (1202504) | 1984-2007; 2009 | Valores totales diarios de precipitación | mm | Estación climatológica ordinaria |
| Turbo | Turbo | El Dos (1202706) | 1987-2008 | Valores medios diarios de caudales | m ³ /s | Limnimétrica |
| Turbo | Turbo | El Dos (1202706) | 1990-1999 | Transporte diario de materiales en suspensión | kton/día | Limnimétrica |
| Churidó | Apartadó | El Casco (1201007) | 1985-2009 | Valores totales diarios de precipitación | mm | Estación pluviométrica |
| Apartadó | Apartadó | Apartadó (1201706) | 1985-2009 | Valores medios diarios de caudales | m ³ /s | Limnimétrica |
| Apartadó | Apartadó | Apartadó (1201706) | 1978-1981; 1985-1988; 1990; 1993; 1995-2009 | Concentración media diaria de sedimentos en suspensión | kg/m ³ | Limnimétrica |
| Carepa | Carepa | Tulepana (1201506) | 1983-2010 | Valores totales diarios de precipitación | mm | Estación climatológica ordinaria |
| Carepa | Carepa | Carepa (1201708) | 1978-1993; 1995-2007 | Valores medios diarios de caudales | m ³ /s | Limnimétrica |
| Carepa | Carepa | Carepa (1201708) | 1977-2008 | Concentración media diaria de sedimentos en suspensión | kg/m ³ | Limnimétrica |
| Vijagual | Carepa | Los Cerros (1201507) | 1983-2010 | Valores totales diarios de precipitación | mm | Estación sinóptica principal |
| Vijagual | Apartadó | La Victoria (1201703) | 1977-1996 | Valores medios diarios de caudales | m ³ /s | Limnimétrica |
| Vijagual | Apartadó | La Victoria (1201703) | 1978-1980; 1984-1993; 1995-1996 | Concentración media diaria de sedimentos en suspensión | kg/m ³ | Limnimétrica |
| León | Chigorodó | La Palmera (1201509) | 1991-2008 | Valores totales diarios de precipitación | mm | Estación climatológica ordinaria |
| Chigorodó | Chigorodó | Chigorodó (1201701) | 1977-2009 | Valores medios diarios de caudales | m ³ /s | Limnimétrica |
| Chigorodó | Chigorodó | Chigorodó (1201701) | 1983-1988; 1992; 1993; 1995-2007 | Concentración media diaria de sedimentos en suspensión | kg/m ³ | Limnimétrica |
| León | Chigorodó | Barranquillita (1201003) | 1985-2009 | Valores totales diarios de precipitación | mm | Estación pluviométrica |
| León | Chigorodó | Barranquillita (1201702) | 1977-2009 | Valores medios diarios de caudales | m ³ /s | Limnimétrica |
| León | Chigorodó | Barranquillita (1201702) | 1978-1993; 1995-1996; 1998-2007 | Concentración media diaria de sedimentos en suspensión | kg/m ³ | Limnimétrica |