

1. INTRODUCCIÓN

En el proceso de exportación de sedimentos desde las cuencas hidrográficas hacia el mar por medio de los ríos, interviene un gran número de variables que van desde procesos naturales de formación de sedimentos fuera como dentro del río, entre los que se encuentra, el origen de los sedimentos, el tipo de sedimento, el tamaño de las partículas sedimentadas, el transporte, y la relación con el régimen del caudal, con el clima y además de la intervención antrópica (Monsalve, 1995; Restrepo, 2005; Richards, 2004). Conocer estos procesos es fundamental para entender el funcionamiento, la dinámica y el comportamiento de la exportación de sedimentos en los ríos hacia cuencas de mayor tamaño y hacia los mares y océanos del mundo.

Teniendo en cuenta lo anterior, el proceso principal que interviene en la formación de sedimentos es conocido como erosión y ocurre fuera y dentro del río. Fuera del río, la fuerza ejercida por la lluvia y el viento, erosiona el suelo removiendo partículas de éste. Algunas partículas de sedimentos formadas son transportadas a los cuerpos de agua por la escorrentía superficial que ocurre luego de una lluvia intensa moviendo partículas por la superficie del terreno, otras quedan almacenadas en el suelo o quedan atrapadas por la cobertura boscosa. Cuando el suelo está desforestado o su cobertura forestal prístina ha sido cambiada por grandes extensiones de cultivos, la erosión y la escorrentía superficial ocurren más rápidamente, llevando consigo una mayor cantidad de partículas sedimentarias hacia los ríos, ya que pocas partículas de sedimento quedan atrapadas por falta de una cobertura vegetal boscosa que los capture (Monsalve, 1995; Lugo et al. 1980; Smith y Smith, 2003). Adicionalmente, dentro del río, la fuerza ejercida por las corrientes da como resultado la erosión de los diferentes tipos de rocas que se encuentran en el lecho del río debido a la trituración y

fragmentación continua de éstas provocando una pérdida de masa, estas rocas por lo general suelen ser de arenas gruesas y finas, arcillas, calizas, gravas y limos, las cuales al ser trituradas o fragmentadas forman distintos tamaños de partículas de sedimentos que, algunas, son exportadas por las corrientes y caudales y otras quedan almacenados en el lecho del río (Gordon et al. 2004; Monsalve, 1995). En ambos procesos es fundamental conocer la geología de la cuenca hidrográfica, ya que dependiendo de su formación geológica, ya sea sedimentaria (arcillolitas, areniscas o conglomerados), ígneas (volcánicas y plutónicas) o metamórficas, las características de los sedimentos serán diferentes.

Por otra parte, esta exportación de sedimentos se puede medir de dos maneras, la primera es por medio de la producción de sedimentos (*sediment yield*) que mide el transporte de sedimentos neto o ponderado para cada kilómetro cuadrado (Km^2), y es la relación entre la cantidad total de sedimentos en suspensión y el área de la muestra ($\text{tn}/\text{km}^2/\text{año}$). La segunda es por medio de la carga de sedimentos (*sediment load*) y se expresa como medida de la cantidad de partículas sólidas que se mueven por la acción del flujo del agua, por unidad de tiempo ($\text{tn}/\text{año}$). La carga de sedimentos generalmente incluye carga de fondo (partículas sumergidas que se mueven en el lecho del río), carga en suspensión (partículas suspendidas en el cuerpo de agua, por turbulencia, pero que suelen estar posadas sobre el lecho), y carga lavada o de lavado (partículas finas suspendidas, no sedimentadas, derivadas de la erosión de la pendiente) (Gonzales y García 1998; Montoya y Montoya, 2005; Restrepo, 2005; Richards, 2004). Tanto la producción como la carga de sedimentos están sujetas a las relaciones con el régimen del caudal, a las variaciones climáticas y a la intervención antrópica (intervención humana).

La carga de sedimentos en suspensión puede variar temporalmente dependiendo de los diferentes regímenes de caudal, este proceso se conoce como histéresis (Restrepo; 2005), y se refleja cuando hay un aumento en la carga de sedimentos al haber un incremento en la magnitud del caudal, el cual se da por la

intensificación de la precipitación local que es influenciada por fluctuaciones aleatorias internas del sistema climático (Poveda, 2004), como por ejemplo, fenómenos naturales como la oscilación estacional de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) y el Fenómeno El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) en su fase positiva (La Niña). De igual manera, la carga de sedimentos puede disminuir, si el caudal desciende cuando la precipitación se debilita, ocasionada, por la oscilación de la ZCIT y por el ENOS pero en su fase negativa (El Niño) (Eder et al. 2010; Morehead et al. 2003; Richards, 2004).

De otro lado, se ha señalado que el reemplazo de la cobertura boscosa prístina por cultivos, potreros, o incluso los cambios producidos por incendios forestales, han aumentado significativamente la producción y concentración de sedimentos en las cuencas hidrográficas (Patrick et al. 2006; Wang et al. 2005; Walling, 1999) originando graves daños en los litorales, en los ecosistemas estuarinos, en los corales y en los manglares, provocando una mayor acumulación de sedimentos en estos ecosistemas y afectando gravemente la fauna y la flora asociadas a cada uno de ellos y provocando una degradación en su diversidad (Larsen y Webb., 2009; Wall et al. 2008; Warne et al. 2005).

2. MARCO TEORICO Y ANTECEDENTES

En los últimos años diversos estudios se han realizado a nivel mundial para entender la relación entre la producción y la carga de sedimentos de los ríos con diversos factores, entre ellos, la topografía, la erosión, la escorrentía, las fluctuaciones climáticas en la precipitación, la oscilación del caudal, fenómenos climáticos y el efecto de los procesos antrópicos.

En este sentido, la topografía y el área de la cuenca tienen un gran efecto sobre la magnitud de la descarga de sedimentos en los ríos en comparación con la precipitación y la escorrentía que tienen en un menor efecto, esto se debe a que en ríos ubicados en áreas de drenaje áridas tienen una producción de sedimentos similar o ligeramente menor a los ríos de montaña con precipitación moderada, mientras los ríos que drenan áreas con precipitaciones mayores tienen producciones ligeramente más altas (Milliman y Syvitski, 1992).

A escala regional la escorrentía, la precipitación y los fenómenos climáticos son los procesos que más explican el transporte neto de sedimentos (Restrepo, 2005). En Sur América y en especial en Colombia la hidroglimatología está fuertemente influenciada por las fases positiva y negativa del ENOS, afectando la precipitación (Poveda, 1997) y las fluctuaciones en el caudal.

Con respecto a los impactos antropogénicos, se estima que la actividad humana es responsable del 80 al 90% de la descarga de sedimentos fluviales a los mares costeros (Escobar, 2002). Walling y Fang (2003) ilustran, cómo en varios ríos del mundo la alta carga de sedimentos está fuertemente influenciada por la remoción de la vegetación natural para tierras de cultivos, causando un aumento en la erosión del suelo y un mayor transporte de sedimentos hacia los ríos. En los países desarrollados la erosión del suelo y el transporte de sedimentos a

disminuido debido a un cambio en las prácticas de la agricultura en los últimos 50 a 100 años, pero sigue en aumento en los países en desarrollo de Asia y América del Sur (Farnsworth y Milliman, 2003).

En Colombia, Restrepo (2005) ha estudiado el comportamiento de los sedimentos en la cuenca fluvial del río Magdalena, en donde ha analizado los factores que influyen en la carga y producción de sedimentos en el río y en sus diferentes tributarios, llegando a la conclusión de que el río Magdalena y algunos de sus tributarios tienen las tasas más altas en producción de sedimentos ($143,9 \times 10^6 \text{ t año}^{-1}$) (Restrepo y Kjerfve, 2002), de toda la Costa este de América del Sur, ocasionando graves implicaciones para el ecosistema marino del océano Caribe en donde desembocan sus aguas. De igual manera, sugiere que estos altos índices de producción y carga de sedimentos pueden estar fuertemente influenciados por las altas tasas de deforestación y los cambios en el uso de la tierra, provocados por la actividad minera, la ganadería y las extensas hectáreas de cultivos que se presenta a lo largo de toda la Cordillera de los Andes colombiana y menciona el efecto que tiene la variación temporal de la precipitación (con una media de 2050 mm año^{-1}) y los efectos ocasionados por la ocurrencia del Fenómeno de El Niño-Oscilación del Sur en las cuencas de los ríos Magdalena y Cauca en donde El Niño resulta en períodos secos con bajos caudales (Magdalena: $2000\text{-}3000 \text{ m}^3/\text{s}$), y la Niña en períodos de excesiva lluvia con caudales muy altos (Magdalena: $12000 \text{ m}^3/\text{s}$), en comparación con el caudal en condiciones normales ($7232 \text{ m}^3/\text{s}$) (Restrepo y Kjerfve, 2000; Restrepo y Kjerfve, 2002). Resultados similares se han reportado para el río Atrato el cual drena una zona de alta precipitación en el país, con una precipitación anual de 12717 mm , un caudal promedio de $2740 \text{ m}^3/\text{s}$ y un transporte de sedimentos de $315 \text{ ton km}^{-2}\text{año}^{-1}$ (Restrepo y Kjerfve, 2000), ejemplificando la fuerte influencia que tienen la alta precipitación y caudal sobre la carga de sedimentos. Por otra parte Montoya y Montoya (2005), han indicado la cantidad de exportación de sedimentos en diferentes cuencas antioqueñas incluyendo algunas cuencas del golfo de Urabá.

En Puerto Rico, Warne et al. (2005), estudiaron cómo el transporte de sedimentos hacia el mar por diferentes ríos, se ve influenciado por los cambios en la precipitación y por el cambio en la cobertura vegetal, además analizaron cómo los huracanes alteran las precipitaciones de la isla, lo cual, a su vez, altera el transporte de sedimentos y todo esto cómo afecta los arrecifes de coral. Este estudio es el único y más extenso realizado hasta la fecha en el Caribe.

2.1 Exportación de sedimentos en el golfo de Urabá

2.1.1. Efectos antrópicos.

El golfo de Urabá se encuentra ubicado en el extremo suroccidental del mar Caribe colombiano y es la zona de Colombia en donde se cultiva la mayor cantidad de banano y de plátano, cubriendo aproximadamente el 73% de la superficie cultivada en esta zona (Blanco, 2009). Los municipios del eje bananero son Apartadó, Carepa, Chigorodó y Turbo, siendo este último el que presenta la producción agrícola más tecnificada e intensiva de la zona con aproximadamente 50359 ha del territorio del golfo de Urabá (García et al. 2007).

La extensa deforestación producto de la siembra intensiva de banano y plátano, parece haber aumentado la producción de sedimentos que son arrastrados a través de las diferentes cuencas que atraviesan los cultivos llegando al litoral y al mar (Blanco, 2009). Entre estas cuencas, se encuentran en la vertiente oriental del golfo, el río Turbo que tiene un transporte neto de sedimentos de $445\text{tonkm}^{-2}\text{año}^{-1}$, el río Carepa transporta $2048\text{ton km}^{-2}\text{año}^{-1}$, el río Chigorodó $1088\text{ton km}^{-2}\text{año}^{-1}$, el río León $1088\text{ton km}^{-2}\text{año}^{-1}$, y el río Currulao transporta $1023\text{ton km}^{-2}\text{año}^{-1}$. Estos ríos se ubican entre los de mayor exportación de sedimentos hacia la cuenca del Caribe Colombiano y entre los más altos del mundo (Restrepo, 2005; Restrepo y Kjerfve, 2002). Estas altas exportaciones de sedimentos han causado graves daños en los ecosistemas marinos, y en el caso del golfo de Urabá se ha sugerido

un posible efecto en los manglares (Blanco, 2009) debido posiblemente a la acumulación de materiales sedimentarios en su interior.

2.1.2. Climatología del golfo.

El golfo de Urabá presenta un clima húmedo tropical y se encuentra ubicado en una franja de baja presión llamada Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) en donde en época lluviosa las corrientes de los vientos Alisios del suroeste que entran al país por la costa chocoana, son dirigidos por la cuenca del río Atrato en dirección norte-sur hacia el golfo de Urabá. En época seca la ZCIT se desplaza oscilante alrededor del Ecuador en una posición septentrional en el océano Pacífico desde finales de Diciembre hasta principios de Abril los cuales son meses de baja precipitación. En el golfo se da un período de lluvia entre Mayo y Noviembre (2500mm/mes en Noviembre) y un período seco desde Diciembre hasta mediados de Abril (100mm/mes en Febrero) (García et al. 2007). Por lo cual esta alta precipitación hace del golfo de Urabá, es una zona estacionalmente lluviosa, lo que puede ocasionar un mayor aumento de arrastre de sedimentos hacia los diferentes ríos que drenan el golfo.

2.1.3. Geología del golfo

La cuenca de Urabá se encuentra localizada en el golfo de Urabá. Tectónicamente está incluida en el terreno Sinú-San Jacinto. Litológicamente está conformado por sedimentitas cuya edad está comprendida entre el Oligoceno y el Plioceno (IGAC, 2001), edades pertenecientes a la Era del Cuaternario, que son considerados los depósitos más recientes, los cuales dan origen a las arenas gruesas y finas, arcillas, calizas, gravas y limos, que en mayoría conforman la mayor parte de los sedimentos de las planicies de las cuencas hidrográficas del golfo oriental (Hermelin, 2006; IGAC, 2001), lo que puede facilitar una mayor erosión, debido a

la litología de la cuenca hidrográfica, proporcionando mayor cantidad de sedimentos a los ríos.

Dentro de este marco ha de considerarse, que aunque algunos estudios hidrológicos han incluido información sobre la carga y a la producción de sedimentos, ninguno se ha enfocado en estudiar las dinámicas de la exportación de sedimentos y su posible relación con las actividades humanas y los factores climáticos naturales que ocurren a lo largo de las cuencas hidrográficas sobre los diferentes tributarios del golfo de Urabá. Tampoco se sabe cómo todo esto ha afectado los ecosistemas marinos de la zona. Por eso es de gran importancia este estudio que se realizó en conjunto con la Universidad de Antioquia, la Corporación Académica Ambiental, de la Universidad de Antioquia, y la Corporación para el Desarrollo Sostenible del Urabá -CORPOURABA-, en el marco 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”.

3. HIPOTESIS

3.1. Hipótesis 1.

Si el caudal de los ríos tributarios del golfo de Urabá aumenta estacionalmente, *ENTONCES*, la exportación de sedimentos tiende a aumentar, *PORQUE*, ésta varía de un período climático a otro dependiendo de la erosión que la escorrentía y el caudal ocasionan en función de la cantidad de precipitación y la capacidad de filtración y de drenaje que tiene el suelo.

3.2. Hipótesis 2.

Si fenómenos como el Niño y la Niña tienen un efecto directo sobre el clima regional, *ENTONCES*, se espera que haya una dinámica de exportación de sedimentos al golfo de Urabá en función de estos fenómenos, *PORQUE*, los cambios en la precipitación presentados durante y después de cada fenómeno afectan los flujos de caudales de los diferentes tributarios del golfo de Urabá y por lo tanto la producción de sedimentos.

3.3. Hipótesis 3.

Si el área de la cobertura vegetal natural (bosques) que rodea las cuencas hidrográficas en los distintos tributarios del golfo de Urabá es diferente, *ENTONCES*, la dinámica y la exportación de sedimentos en estos tributarios varía, *PORQUE*, la magnitud de la erosión del suelo, la intensidad de la escorrentía y la capacidad de filtración de suelo, responden a factores antrópicos como las grandes extensiones de cultivos que rodean las cuencas hidrográficas.

4. OBJETIVOS

4.1. Objetivo general.

- Analizar si la dinámica en la exportación de sedimentos en diferentes cuencas de la vertiente oriental del golfo de Urabá responde a factores climáticos naturales o a procesos antrópicos que han alterado la cobertura vegetal natural.

4.2. Objetivos específicos.

- Determinar la relación entre el caudal y la exportación de sedimentos utilizando series de tiempo anual y mensual, correlacionando ambas variables, en diferentes cuencas de la vertiente oriental del golfo de Urabá.
- Estimar el efecto de los factores climáticos como el Fenómeno El Niño-Oscilación del Sur en las tendencias temporales anuales y mensuales de caudal y de la exportación de sedimentos en diferentes cuencas de la vertiente oriental del golfo de Urabá.
- Estimar el efecto de las actividades humanas en el caudal y en la dinámica de la exportación de sedimentos en diferentes cuencas de la vertiente oriental del golfo de Urabá.

5. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1. Área de estudio

El golfo de Urabá se encuentra ubicado en el extremo suroccidental del mar Caribe colombiano y es el golfo más grande con 80 Km de largo y 25 Km de ancho. El territorio que comprende el golfo de Urabá va desde Cabo Tiburón (Colombia) hasta punta Arboletes, límite entre Antioquia y Córdoba. Limita al norte con el mar Caribe, al sur con la serranía de Abibe, y al occidente con Panamá. Su franja costera mide aproximadamente 543 km de borde litoral que corresponden a los departamentos de Antioquia y Chocó (Urabá Antioqueño y Urabá Chocoano, respectivamente), cuyo límite se encuentra en la parte occidental del golfo en donde el litoral es de costas bajas y cenagosas dando lugar al delta del río Atrato. En la parte oriental, el litoral es más bajo con terrazas y playas. En el Urabá Antioqueño el litoral ocupa el 83% del total de las orillas del golfo, extendiéndose 453 km sobre el costado sur y oriental del golfo. Esta zona comprende los municipios de Turbo, Necoclí, San Juan de Urabá y Arboletes, siendo estos los de mayor importancia costera y urbana, además están rodeados por los municipios con gran desarrollo urbano y rural como Apartadó, Carepa, Chigorodó y Mutatá. (García et al. 2007)

5.2. Cuencas hidrográficas estudiadas

Este estudio utilizó diferentes cuencas hidrográficas localizadas que tributan sus aguas al golfo de Urabá, el cual cuenta con aproximadamente 35 corrientes entre ríos, arroyos y quebradas, que tienen una gran influencia en la dinámica del caudal y de sedimentos que se presenta en el golfo (García et al. 2007).

Se recopilaron series de tiempo de varias estaciones del Instituto Colombiano de Meteorología e Hidrología (IDEAM) ubicadas en la planicie costera del Urabá, tributando sus aguas al golfo de Urabá y al mar Caribe: valores totales diarios de precipitación (mm) y valores medios diarios de caudales (m^3/s) para las cuencas de Turbo, León, Apartadó, Chigorodó, Carepa, Mulatos y Vijagual; transporte diario de materiales en suspensión (kton/día) para Turbo y concentración media diaria de sedimentos en suspensión (kg/m^3) para León, Apartadó, Chigorodó, Carepa, Mulatos y Vijagual (Anexo1).

5.3. Análisis estadísticos.

Con el fin de identificar dinámicas características asociadas a la precipitación, al caudal y a la exportación de sedimentos, se realizaron diferentes análisis estadísticos a las series de tiempo. Específicamente se buscó identificar comportamientos independientes entre variables (caudal vs. precipitación; transporte de sedimentos vs. caudal), tendencias y ciclos temporales intra-anales e inter-anales en cada río, reconocer puntos de cambio y valores extremos y promedios (máximos, medias y mínimos).

Se analizó si las tendencias y dinámicas de las series de tiempo se deben a factores climáticos como la influencia de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) y/o a factores antrópicos como la deforestación y cultivos extensivos a lo largo de las cuencas hidrográficas.

Para la realización de los diferentes análisis estadísticos y gráficas se utilizaron paquetes estadísticos como el IBM SPSS Statistics 19, SigmaPlot 11, Minitab 16 Statistical Software. También se utilizó el ArcGIS 9,3 para la cuantificación de la cobertura de bosques en varios cuadrángulos a partir de aerofotografías multitemporales.

5.3.1. Manejo de las variables.

Para cada serie de tiempo se escogieron los valores mensuales de cada uno de los años registrados, para su análisis estadístico. El total mensual se trabajó para las series de precipitación. Para las series de caudal, de concentración y de transporte de sedimentos se trabajó con la media mensual reportada.

La variable de concentración media diaria de sedimentos en suspensión (kg/m^3) fue transformada para su análisis en kton/día , convirtiéndose en producción bruta de sedimentos, denominada exportación de sedimentos (Q_s). Para transformar esta variable, se multiplicó la concentración (kg/m^3) por el caudal (m^3/s), en el mismo intervalo de tiempo, convirtiendo las unidades de la concentración (kg/m^3) en kilogramo sobre segundo (kg/s), lo que permitió convertir los kilogramos en kilotoneladas (kton) y los segundos en días. Esto se hizo con el fin de que la variable concentración media diaria de sedimentos en suspensión, la cual es una medida de la concentración de sedimentos (kg/m^3) en la columna de agua, quedara convertida en carga de sedimentos (sediment load = carga de sedimentos = exportación de sedimentos) expresando la cantidad de partículas de sedimentos que se transportan por unidad de caudal por unidad de tiempo (kton/día). Cuando se utilizó la variable transporte diario de materiales en suspensión, esta fue expresada en kton/día dentro de las series de tiempo, no se le hizo ninguna modificación, pero se denominó de la misma forma que la variable anterior.

5.3.2. Estadísticos y gráficas.

5.3.2.1. Variabilidad estacional.

Los estadísticos utilizados para identificar la variabilidad mensual intra e inter anual de la precipitación, el caudal y la exportación de sedimentos, fueron Análisis de Varianza (ANOVA) de una vía, con un 95% de confianza y gráficas de cuartiles

(Box-plot) anuales y mensuales para así identificar tendencias y ciclos estacionales de cada variable.

5.3.2.2. Relación entre exportación de sedimentos y caudal.

Se realizaron gráficas de ejes dobles en Y entre las medias de la exportación de sedimentos y del caudal en un mismo intervalo de tiempo en años (serie de tiempo) observando la distribución de los datos y valores extremos. También se realizaron gráficas de regresión mostrando su respectiva ecuación de la línea recta indicando la relación entre el caudal y la exportación de sedimentos, además se hizo el coeficiente de determinación (r^2) y una Correlación Paramétrica de Pearson, con un 95% de confianza (Tallaksen y Van-Lanen, 2004).

5.3.2.3. Distribución del caudal y de la precipitación. Influencia de El Niño-Oscilación del Sur (ENOS):

Se realizaron gráficas de ejes dobles en Y entre las medias de precipitación y las medias de caudal en un mismo intervalo de tiempo (serie de tiempo) en años con el fin de identificar la dinámica en el comportamiento del caudal respecto a la precipitación. Se muestra la ecuación de la línea recta para indicar la relación entre el caudal y la precipitación y el coeficiente de determinación (r^2) y Correlación Paramétrica de Pearson, con un 95% de confianza. En estas gráficas se identificaron los años en que se presentó el fenómeno del ENOS, mostrando las barras en los años en que se presentó una anomalía positiva (Niña) en la precipitación en color azul y las anomalía negativa (Niño) en la precipitación en rojo, los años de transición entre un evento y otro se presentaron de color lila y los años normales en color gris. En estas mismas gráficas se muestran los mismos estadísticos nombrados anteriormente entre la precipitación y entre el Índice de Oscilación del Sur (IOS: datos tomados de National Weather Service: Climate

Prediction Center, 2011) (Restrepo, 2005), para cada río, con el fin de observar el efecto de los eventos del El Niño y de La Niña en esta variable.

5.3.2.4. 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. Se buscaron fotografías aéreas de las cuencas del río Apartadó de los años 1961 y 2005 y del río Chigorodó de los años 1961 y 2007. Las imágenes de 1961 fueron obtenidas del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) y las imágenes de 2005 y 2007 del Departamento de Planeación del Departamento de Antioquia, Catastro Departamental, consiguiendo así cubrir periodos entre los 44 y 46 años, respectivamente. Las categorías de la cubierta y del uso de la tierra (bosque y otros-cualquier tipo de cobertura vegetal diferente a bosque) fueron interpretadas y polígono-delineadas para computar las áreas y el porcentaje correspondiente a cada área en cada año estudiado. Los cambios en las dos categorías fueron computadas estableciendo así la tasa de deforestación aproximada de bosque durante los dos intervalos de tiempo.

Por otro lado, para mirar si el incremento en la exportación de sedimentos era debido a factores de origen antrópicos, se elaboraron gráficas de dispersión de doble masa (caudal acumulado y exportación de sedimentos acumulados) (Walling y Fang, 2003; Gordon et al. 2004) que además fueron utilizadas para analizar efectos climáticos sobre la exportación de sedimentos. De igual manera se realizó una regresión lineal, mostrando la ecuación de la recta, el coeficiente de determinación (R^2), la prueba F de Fisher con sus respectivos grados de libertad y la diferencia significativa del modelo. Las gráficas fueron ajustadas con ecuaciones en cada uno de los períodos de corte de estas.

6. RESULTADOS

6.1. Variabilidad estacional.

Con los análisis de varianza de una vía (ANOVA), se observó que hay diferencia significativa en la precipitación intra-anual en cada uno de los sitio de estudio (ANOVA: $p < 0.001$; $p < 0,010$) (Tabla 1), en cambio, en la precipitación inter-anual fue solo significativa para las estaciones de León y Chigorodó (ANOVA: $p < 0.003$), (Tabla 2). Para el caudal, se encontró diferencias altamente significativas intra e inter-anual en todos los sitios de estudio (ANOVA: $p < 0.001$) excepto en Mulatos (ANOVA: $p < 0,026$). Con respecto a la exportación de sedimentos se hallaron diferencias altamente significativas intra-anales en todos los ríos excepto en Turbo: (ANOVA: León, Carepa, Mulatos: $p < 0.0001$; Apartadó: $p < 0,007$; Chigorodó: $p < 0,032$; Vijagual: $p < 0,010$). La variación inter-anual fue significativa en todos los ríos analizados: Turbo (ANOVA: $p < 0.005$), León (ANOVA: $p < 0,009$), Apartadó (ANOVA: $p < 0,001$), Chigorodó (ANOVA: $p < 0,007$) y Carepa (ANOVA: $p < 0,001$), Mulatos (ANOVA: $p < 0,026$), y Vijagual (ANOVA: $p < 0,002$).

Tabla 1: ANOVA de una vía para la variabilidad intra-anual de varios parámetros hidrológicos mensuales en cada una de las estaciones estudiadas.

| CUENCA | ESTACIÓN | VARIABLE | G.L. | F | P-VALOR |
|----------|----------|---------------------------|------|--------|---------|
| MULATOS | Turbo | Precipitación | 289 | 14,690 | 0,001 |
| | Turbo | Caudal | 358 | 15,415 | 0,001 |
| | Necoclí | Exportación de sedimentos | 120 | 2,548 | 0,001 |
| TURBO | Turbo | Precipitación | 288 | 13,136 | 0,001 |
| | El Dos | Caudal | 224 | 4,04 | 0,001 |
| | El Dos | Exportación de sedimentos | 101 | 1,101 | 0,369 |
| APARTADÓ | El Casco | Precipitación | 288 | 16,961 | 0,001 |
| | Apartadó | Caudal | 293 | 5,048 | 0,001 |
| | Apartadó | Exportación de sedimentos | 195 | 2,428 | 0,007 |
| CAREPA | Carepa | Precipitación | 322 | 26,563 | 0,001 |
| | Carepa | Caudal | 358 | 8,744 | 0,001 |
| | Carepa | Exportación de sedimentos | 256 | 4,885 | 0,001 |

| | | | | | |
|------------------|----------------|---------------------------|-----|--------|-------|
| VIJAGUAL | Carepa | Precipitación | 310 | 18,443 | 0,001 |
| | Apartadó | Caudal | 220 | 4,660 | 0,001 |
| | Apartadó | Exportación de sedimentos | 115 | 2,409 | 0,010 |
| CHIGORODÓ | La Palmera | Precipitación | 199 | 15,588 | 0,001 |
| | Chigorodó | Caudal | 372 | 10,308 | 0,001 |
| | Chigorodó | Exportación de sedimentos | 188 | 1,985 | 0,032 |
| LEÓN | Barranquillita | Precipitación | 288 | 14,011 | 0,001 |
| | Barranquillita | Caudal | 377 | 48,091 | 0,001 |
| | Barranquillita | Exportación de sedimentos | 252 | 6,547 | 0,001 |

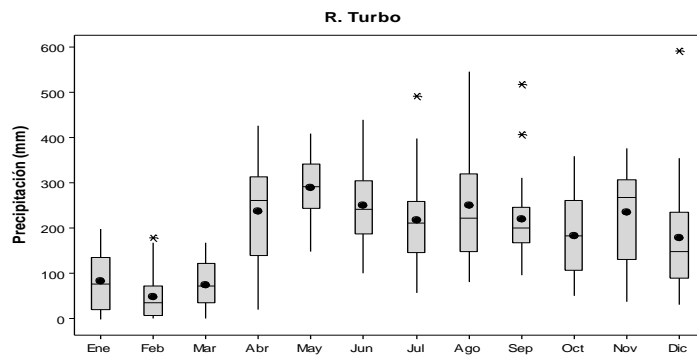
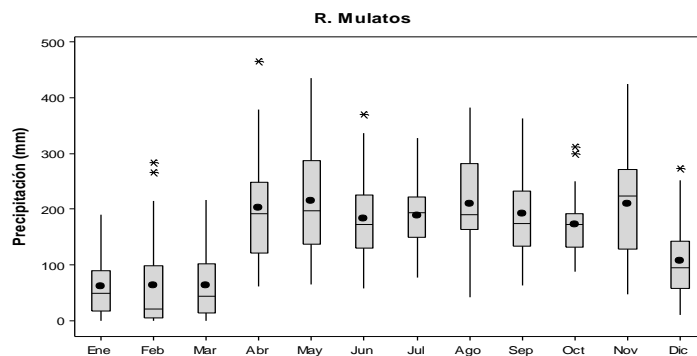
* G.L.: Grados de libertad del error: número de meses menos uno.

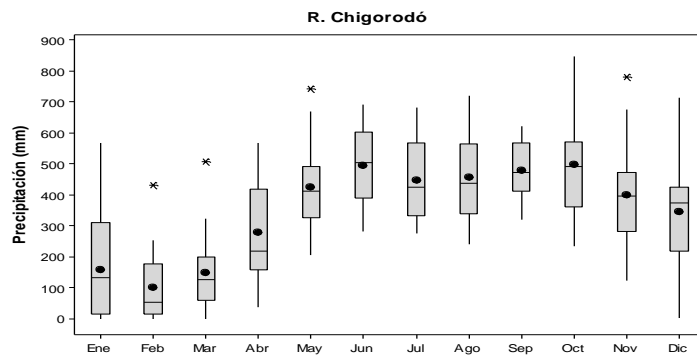
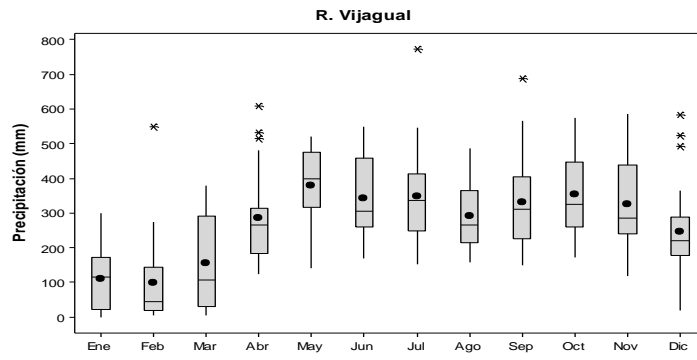
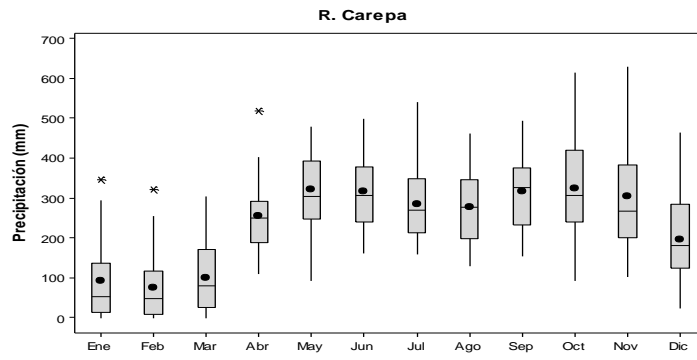
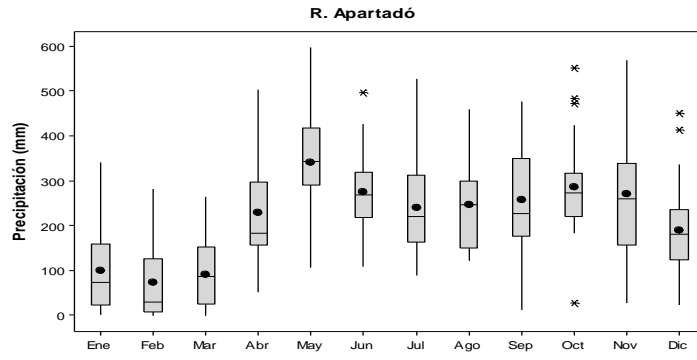
Tabla 2: ANOVA de una vía para la variabilidad inter-anual de varios parámetros hidrológicos mensuales para cada una de las estaciones estudiadas.

| CUENCA | ESTACIÓN | VARIABLE | AÑOS | G.L.** | F | P-VALOR |
|------------------|-----------------|---------------------------|---|---------------|----------|----------------|
| 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 |

** G.L.: Grados de libertad del error: número de años menos uno.

En la variabilidad intra-anual de la precipitación (Figura 1) se observó una significativa variabilidad en precipitación durante los meses del año, sin embargo, se diferenciaron claramente dos estaciones. Los meses que presentaron mayor precipitación están entre Abril y Diciembre y los meses de menor precipitación entre Enero y Marzo en todas las cuencas hidrográficas estudiadas. En Turbo el mes más lluvioso fue Diciembre con la media máxima de 592 mm. En el río León, el mes que presentó una mayor lluvia fue Agosto con 784 mm, en el río Apartadó fue Mayo con 598 mm, el río Chigorodó es Octubre con 846 mm, en Carepa se registró la mayor precipitación en Noviembre con 630 mm, en Mulatos Marzo con 474 mm y en Vijagual en Julio con 773mm. En todas las cuencas hidrográficas se presentó la menor media de precipitación en Febrero, a excepción de Mulatos donde se registró en Enero.





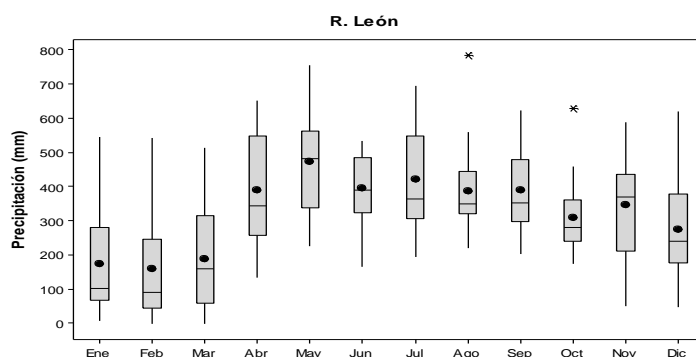
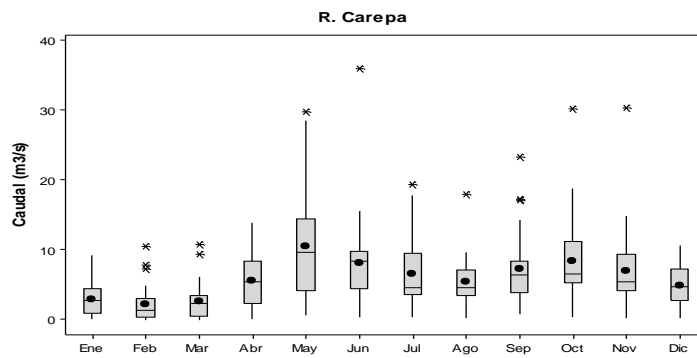
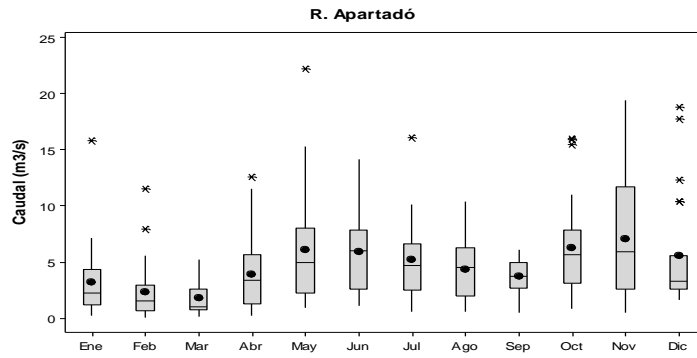
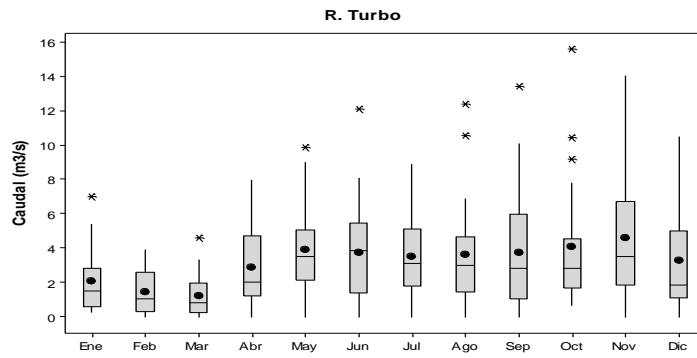
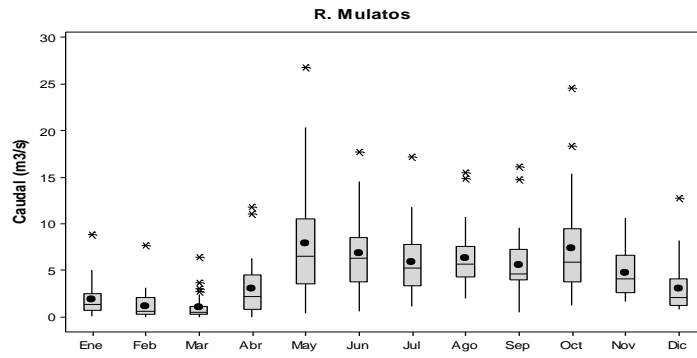


Figura 1: Variabilidad estacional intra-anual de la precipitación en los ríos de la cuenca hidrográfica de Urabá, organizados de Norte a Sur.

En la variabilidad intra-anual para el caudal (Figura 2), al igual que en la precipitación, se observó la alta variabilidad en el caudal durante los meses del año, también con dos estaciones claramente definidas. Los menores caudales se presentaron entre Enero y Marzo, e inician el ascenso en Abril. Los mayores caudales se presentaron entre Mayo y Diciembre, sin embargo el mes con el valor máximo cambia de un río a otro. Los caudales máximos más altos se registraron en el mes de Octubre ($15,6 \text{ m}^3/\text{s}$) en Turbo, en Agosto ($206,1 \text{ m}^3/\text{s}$) en León, en Mayo ($22,1 \text{ m}^3/\text{s}$) en Apartadó, en Junio en Chigorodó ($57,8 \text{ m}^3/\text{s}$) y en Carepa ($35,9 \text{ m}^3/\text{s}$), y en Mayo en Mulatos y Vijagual ($26,70$ y $10,60 \text{ m}^3/\text{s}$, respectivamente). En Turbo, León, Apartadó, Chigorodó y Mulatos, el mes que registró la menor media en caudal fue Marzo, y en Carepa y Vijagual en Febrero.



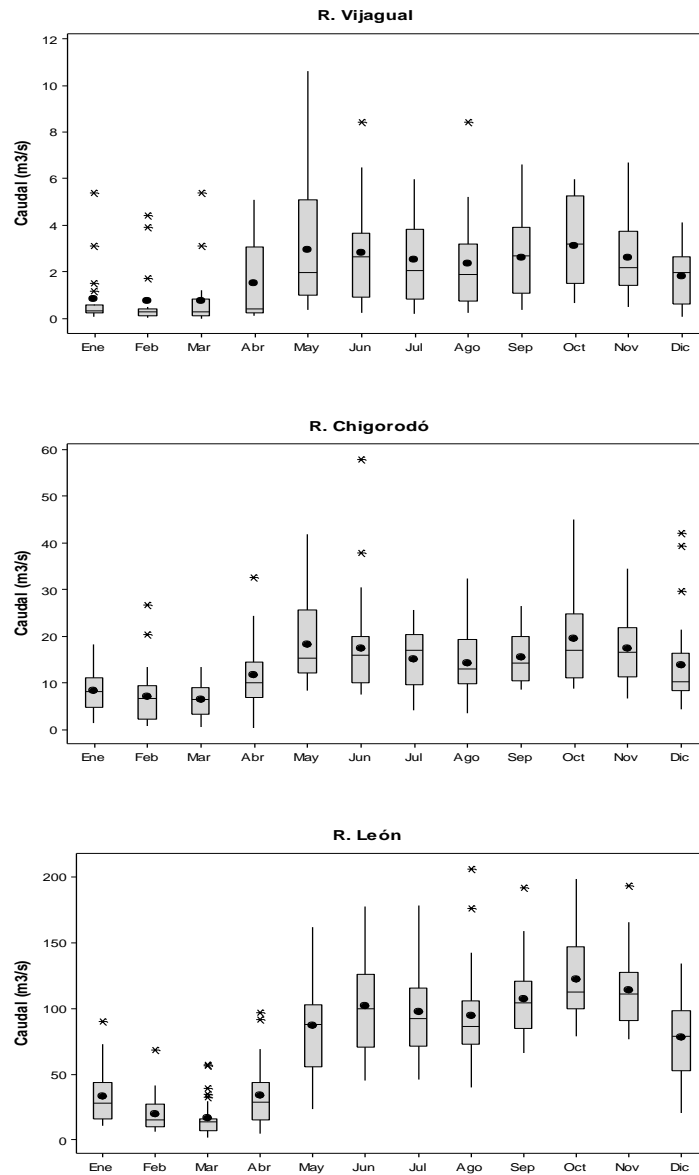
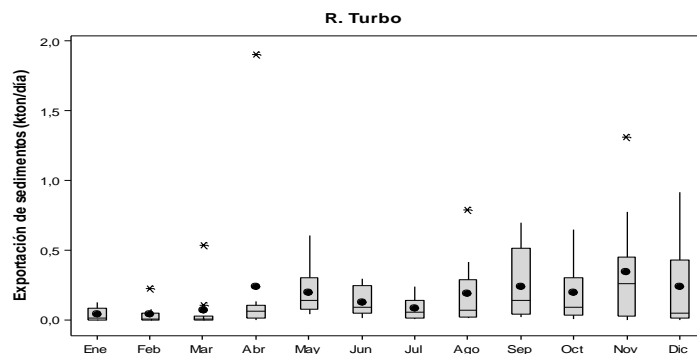
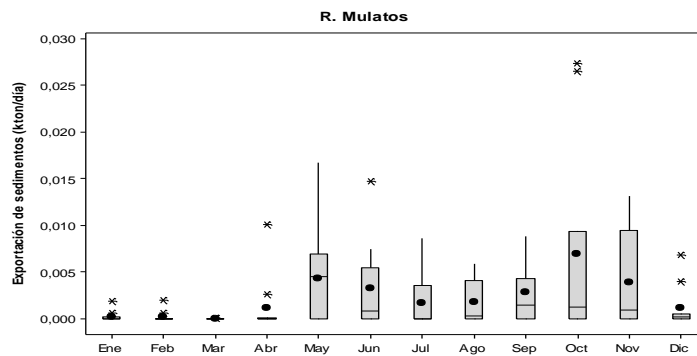
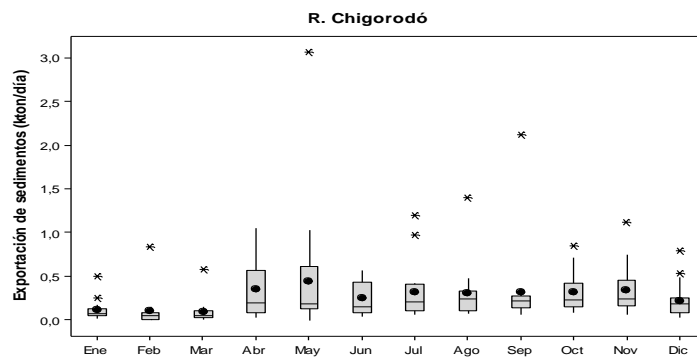
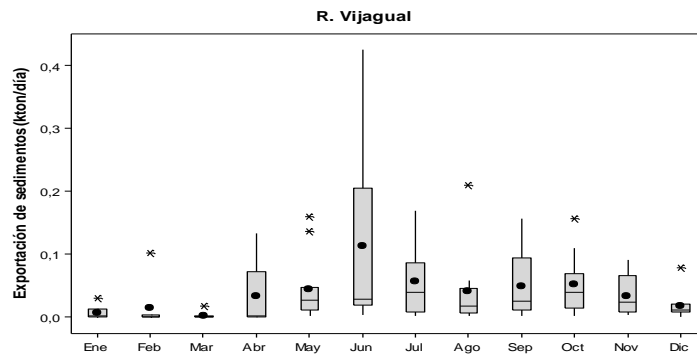
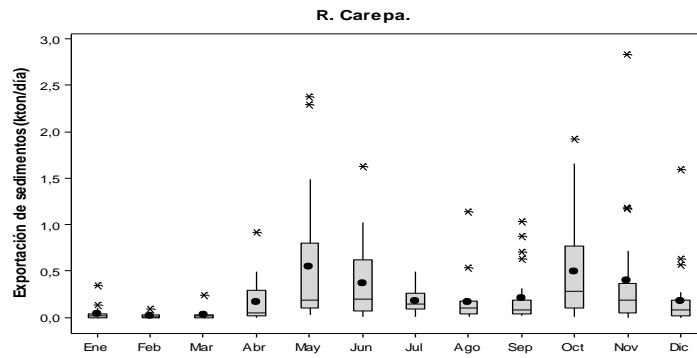
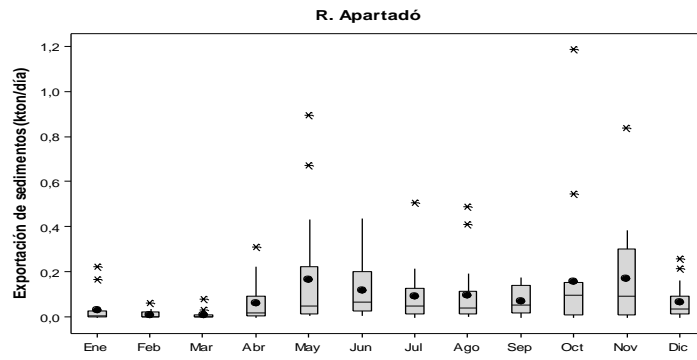


Figura 2: Variabilidad estacional intra-anual del caudal en los ríos de la cuenca hidrográfica del golfo Urabá, organizados de Norte a Sur.

En la variabilidad en la exportación de sedimentos (Figura 3), no hubo variabilidad significativa en Turbo, pero si se observó una alta variabilidad en los otros ríos

estudiados. En general, se observó las mismas estaciones mencionadas para precipitación y caudal. En Turbo el valor más alto se registró en el mes de Abril con 1,9 kton/día, en León en los meses de Mayo con 17,3 kton/día y Septiembre con 16,0 kton/día siendo estos los dos valores más altos registrados para la exportación de sedimentos en todas las cuencas estudiadas, en Apartadó se registró el valor más alto en el mes de Octubre con 1,2 kton/día, en Chigorodó fue en Mayo con 3,1 kton /día, en Carepa fue Noviembre con 2,8 kton/día, Mulatos en Octubre con 0,03 kton/día y en Vijagual en Julio con 0,4 kton/día. De igual manera los meses con menores medias de exportación de sedimentos fueron Febrero para Turbo, Apartadó y Carepa, y Marzo para León, Chigorodó, Mulatos y Vijagual.





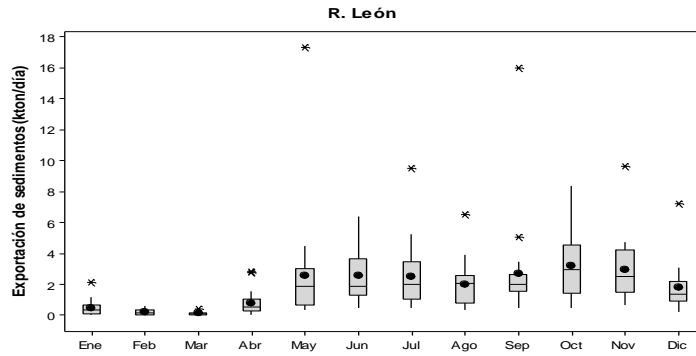
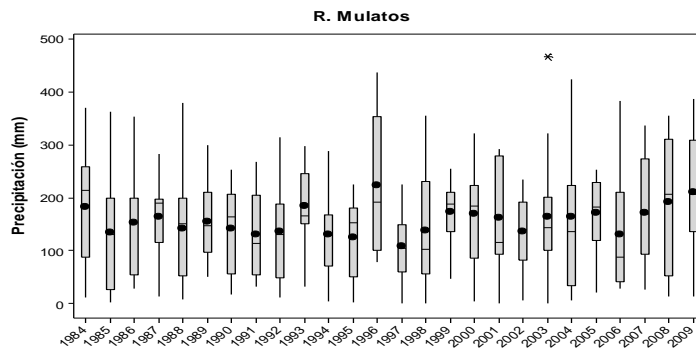
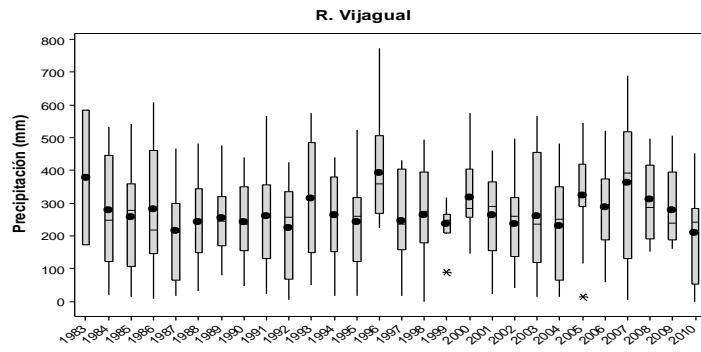
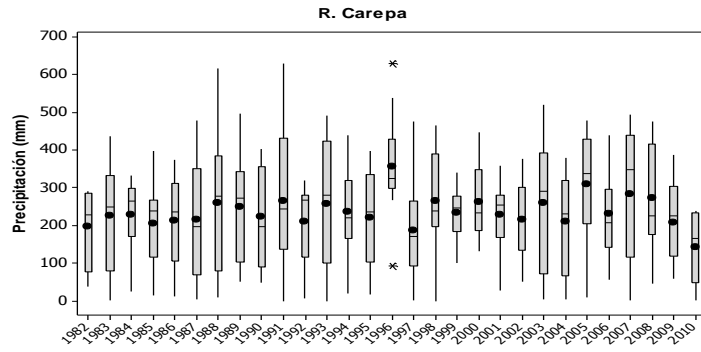
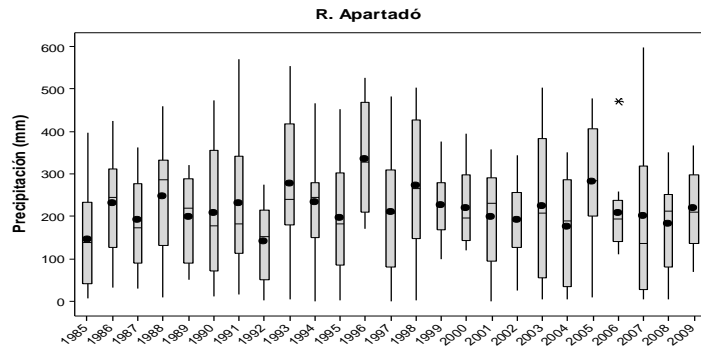
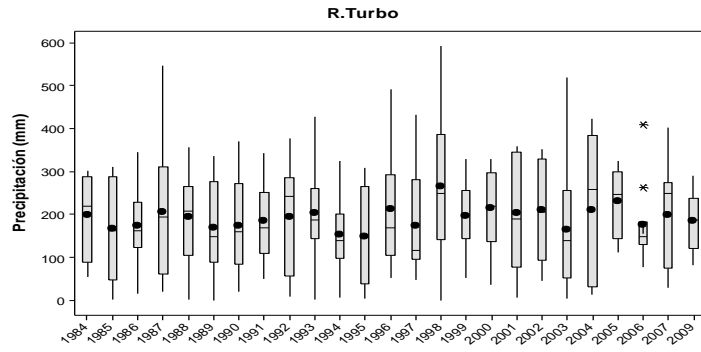


Figura 3: Variabilidad estacional intra-anual de la exportación de sedimentos en los ríos de la cuenca hidrográfica del golfo Urabá, organizados de Norte a Sur.

En Turbo, Apartadó, y Vijagual no se observó una significativa variabilidad inter-anual de la precipitación mensual durante los años de estudio (Figura 4), pero en los ríos León, Chigorodó, Carepa y Mulatos sí.





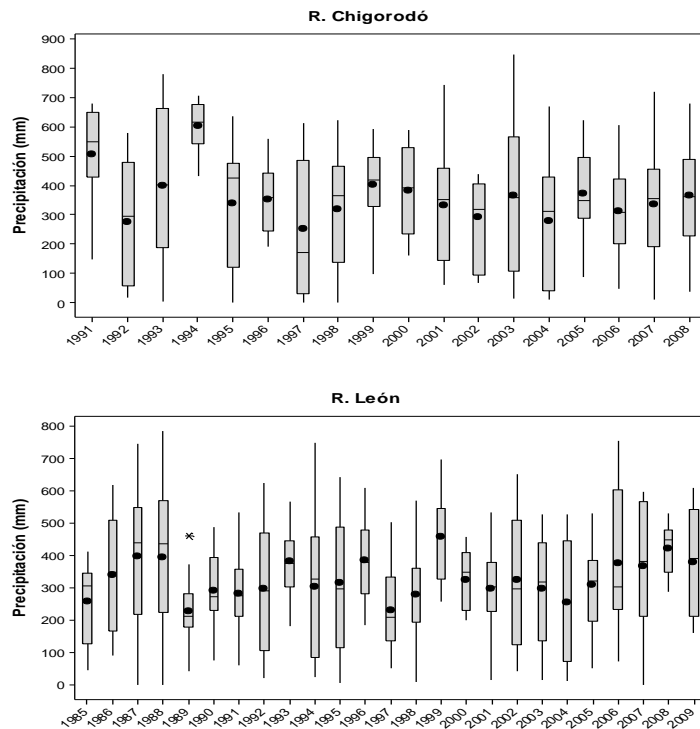
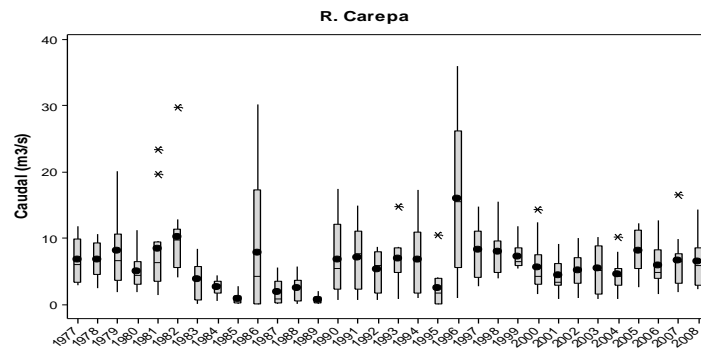
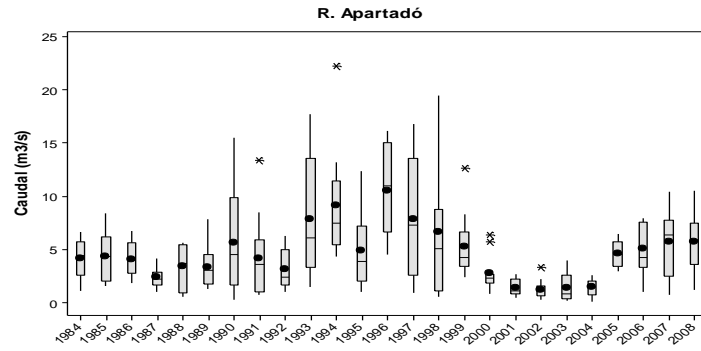
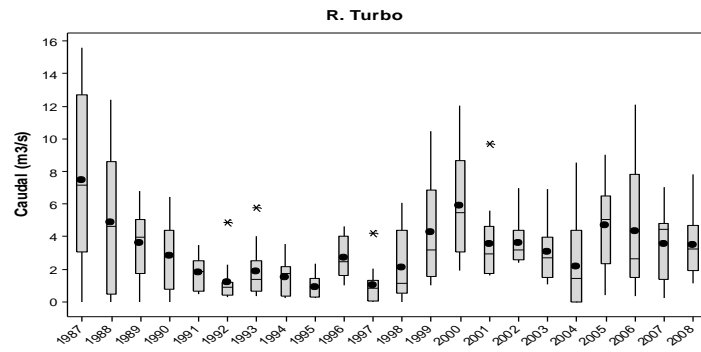
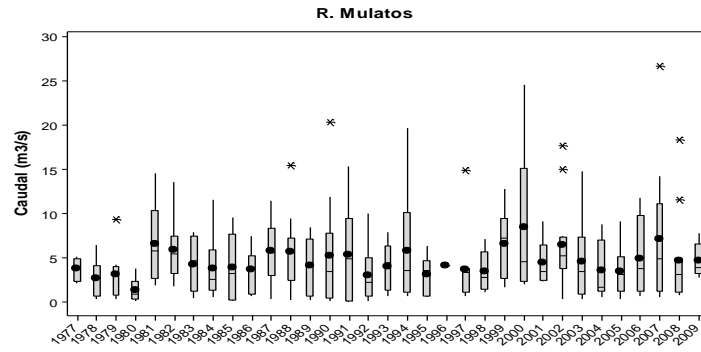


Figura 4: Variabilidad inter-anual de la precipitación mensual (cada caja refleja la variabilidad de los 12 meses del año) en los ríos, de la cuenca hidrográfica del golfo Urabá, organizados de Norte a Sur.

En la variabilidad inter-anual del caudal (Figura 5) se observó la alta variabilidad inter-anual en cada una de los ríos, al igual que en la exportación de sedimentos (figura 6). Esto corrobora los resultados obtenidos en la tabla 2. Se distinguieron varios años consecutivos a principios y a finales de los noventa y principios del 2000 en que el caudal fue bastante bajo en comparación con otros años, de igual manera en la exportación de sedimentos. No se vieron reflejados ciclos o algún tipo de patrón de comportamiento durante los intervalos de tiempo analizados.



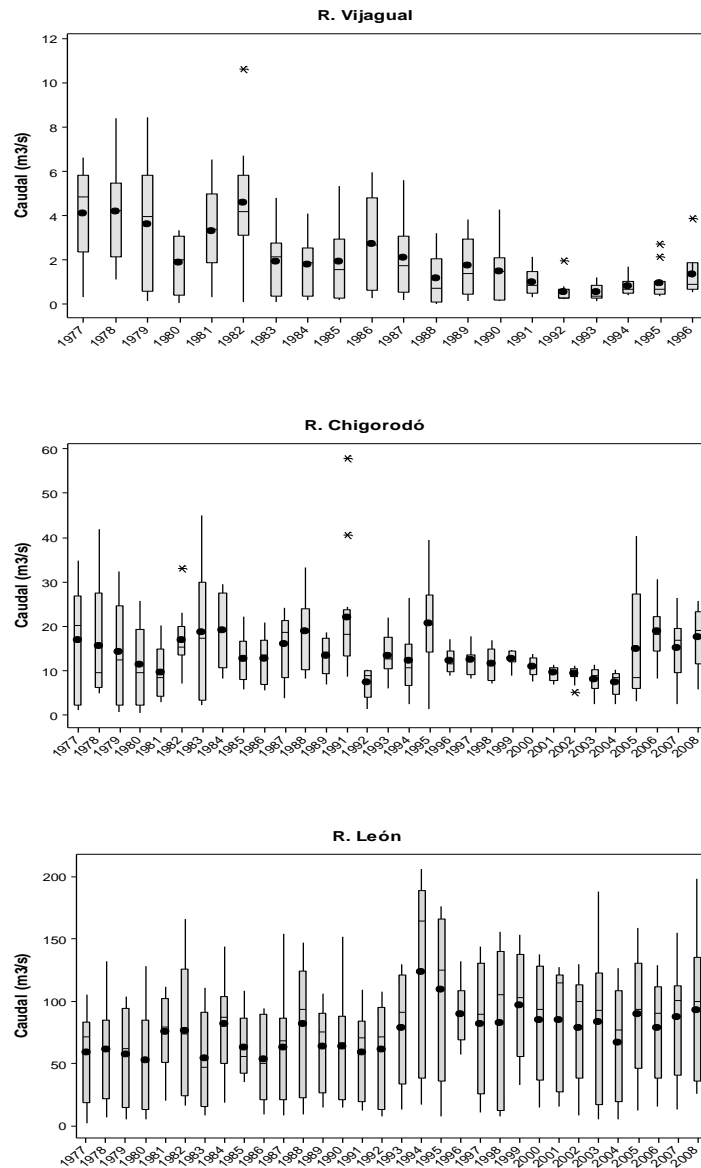
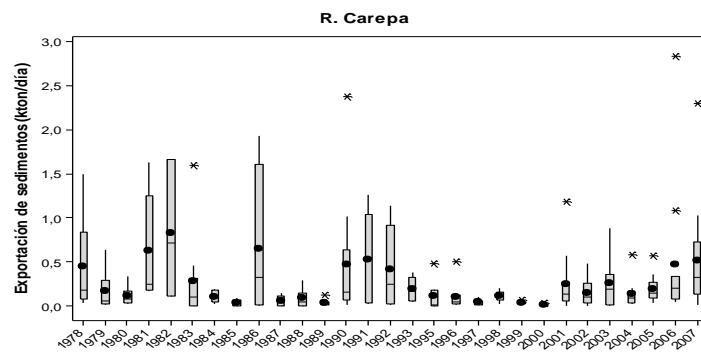
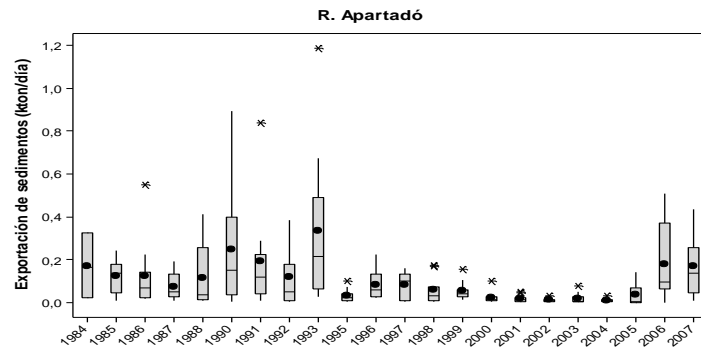
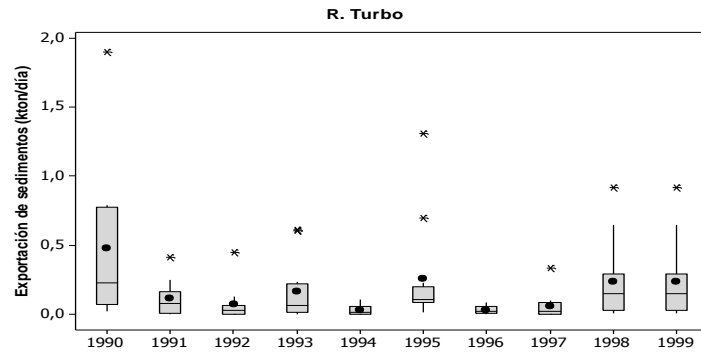
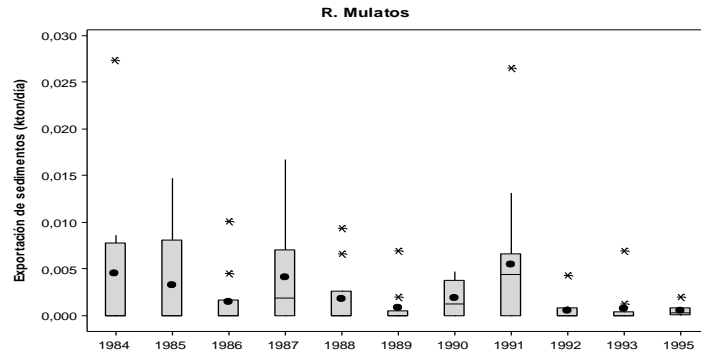


Figura 5: Variabilidad inter-anual del caudal mensual (cada caja refleja la variabilidad de los 12 meses del año) en los ríos, de la cuenca hidrográfica del golfo Urabá, organizados de Norte a Sur.



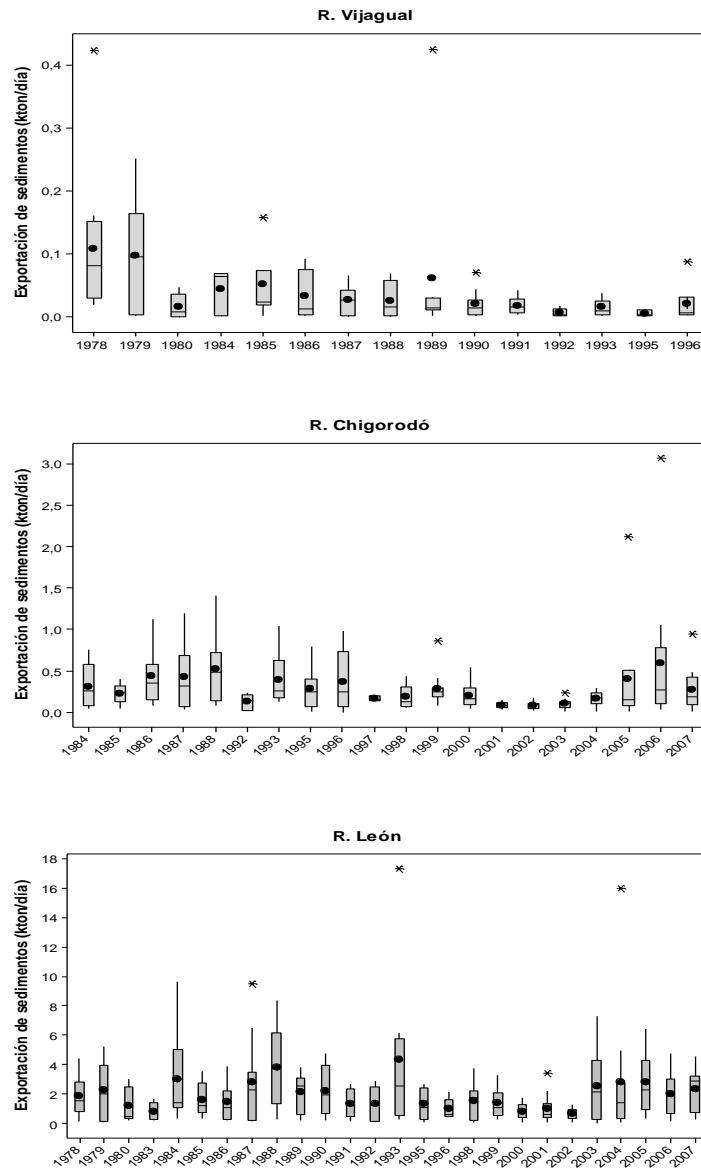
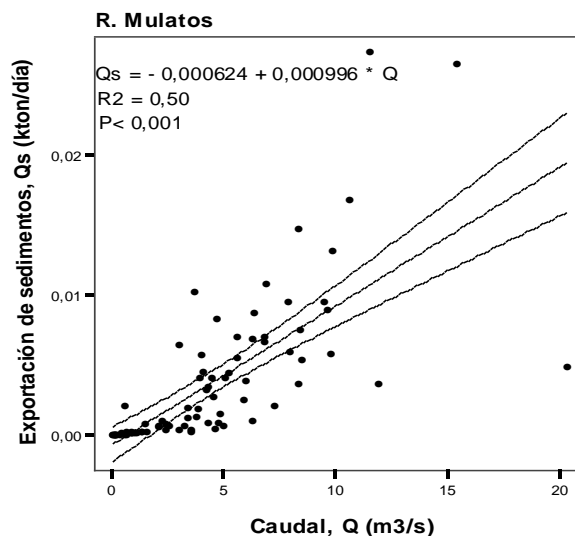
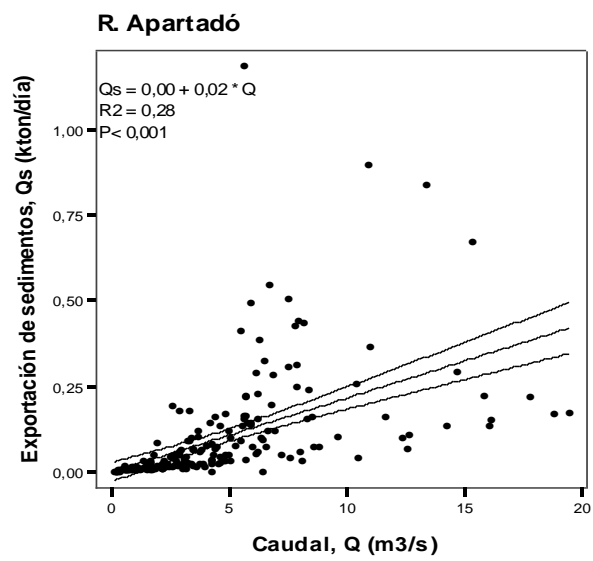
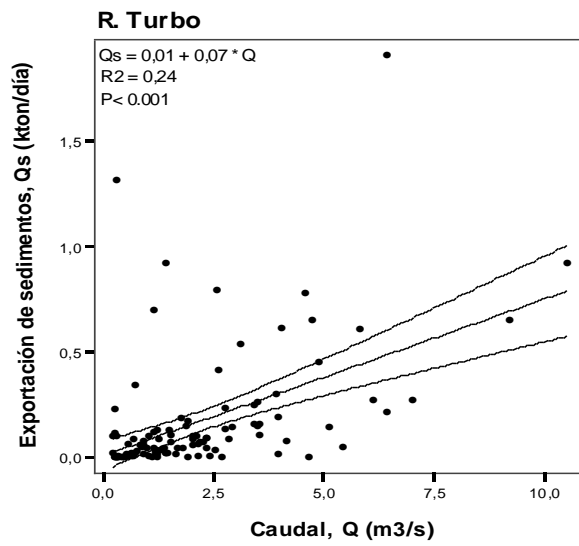


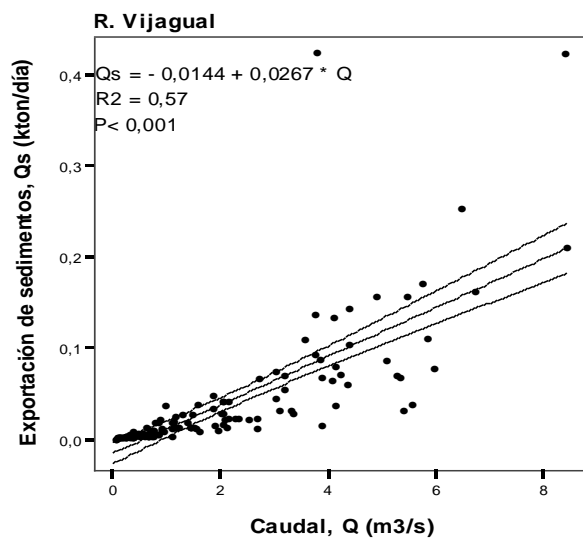
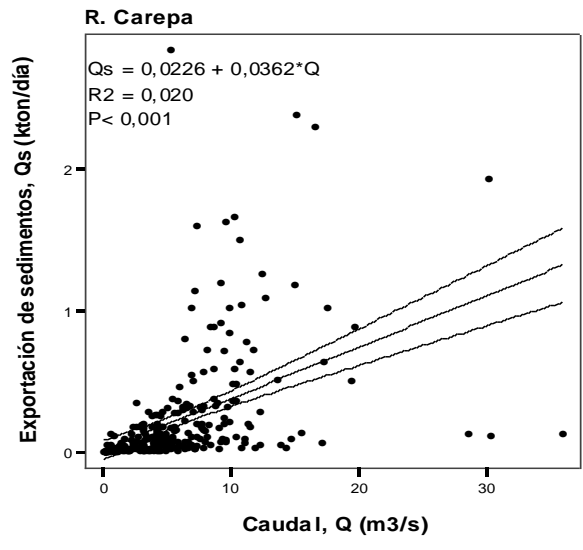
Figura 6: Variabilidad inter-anual de la exportación mensual de sedimentos (cada caja refleja la variabilidad de los 12 meses del año) en los ríos, de la cuenca hidrográfica del golfo Urabá, organizados de Norte a Sur.

6.2. Relación entre exportación de sedimentos y caudal.

En las gráficas de regresión lineal entre el caudal y la exportación de sedimentos para cada río tributario del golfo de Urabá, se encontró que la correlación de Pearson fue estadísticamente muy significativa ($P < 0,001$). Sin embargo, los coeficientes de determinación (R^2) mostraron, en cinco cuencas, una baja influencia de la variabilidad del caudal sobre la exportación (Turbo $r^2=0,24$; León $r^2=0,32$; Apartadó $r^2=0,28$; y Chigorodó $r^2=0,29$; Carepa $r^2=0,020$) y una relativa mayor influencia en dos cuencas (Mulatos $r^2=0,50$ y Vijagual $r^2=0,57$). Las pendientes revelaron que la tasa de cambio de la exportación de sedimentos por unidad de caudal fue comparable entre todas las cuencas con excepción del río Turbo donde se observó un valor significativamente mayor (Turbo $m=0,07$; León $m=0,03$; Apartadó $m=0,02$; Chigorodó $m=0,03$; Carepa $m=0,03$; Mulatos $m=0,001$; Vijagual $m=0,02$) (Figura 7).







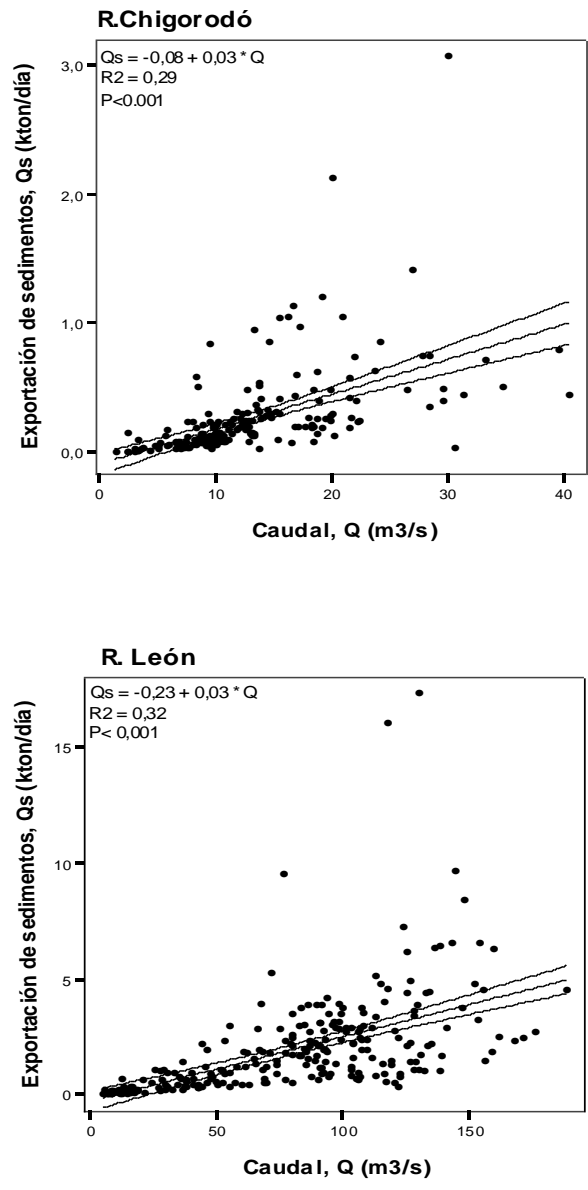
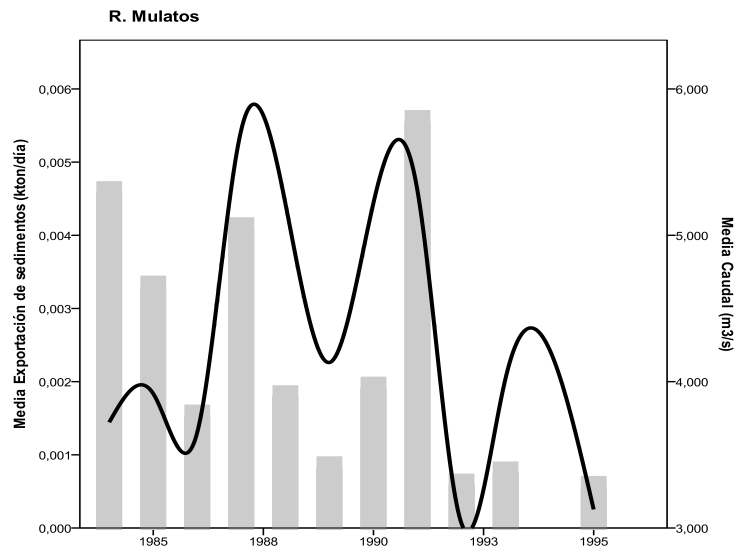
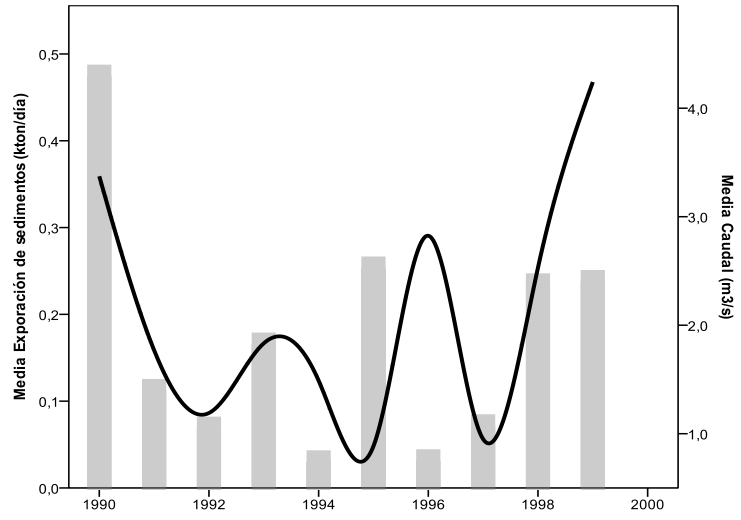


Figura 7: Regresión lineal entre la exportación de sedimentos y el caudal, mostrando la ecuación de la recta y su coeficiente de determinación usando el coeficiente de correlación de Pearson de cada río de la cuenca hidrográfica del golfo Urabá, organizados de Norte a Sur. Se muestra la línea de mínimos cuadrados y el intervalo de confianza.

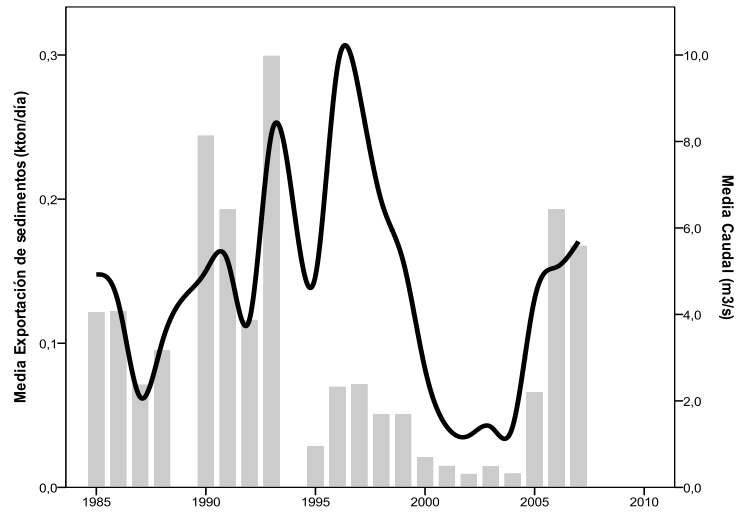
En las gráficas de medias de exportación de sedimentos y medias de caudal para cada estación estudiada, se observó una distribución similar entre ambas variables (Figura 8), pero se observó que la dinámica entre las variables no mostro una relación tan estrecha en comparación con el análisis de regresión. Esta relación se pudo observar cuando, el caudal como la exportación de sedimentos muestran ambas valores altos o valores bajos en un mismo año, por ejemplo (en orden de mayor y menor valor), en los años de 1990 y 1992 en Turbo, 1991 y 1992 en Mulatos, 1993 y principios del 2000 en Apartadó, en Carepa en 1996 y 1995, en Vijagual 1978 y 1992, 1988 y 1992 Chigorodó y por último en León en los años de 1988 y 1980.



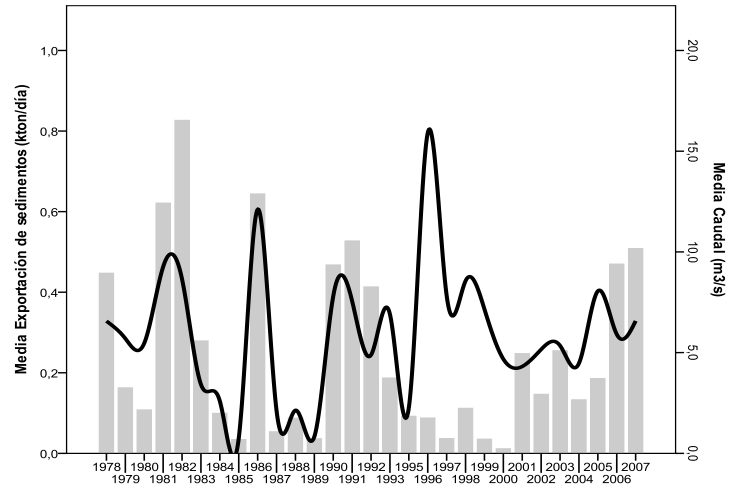
R. Turbo



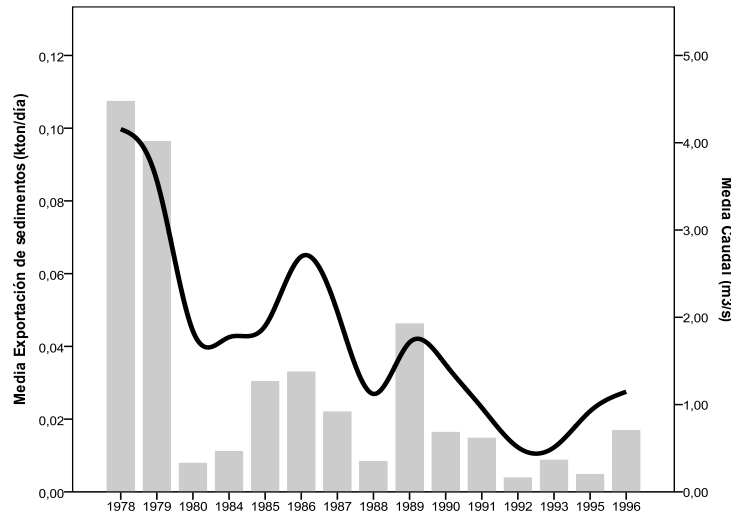
R. Apartadó



R. Carepa



R. Vjagual



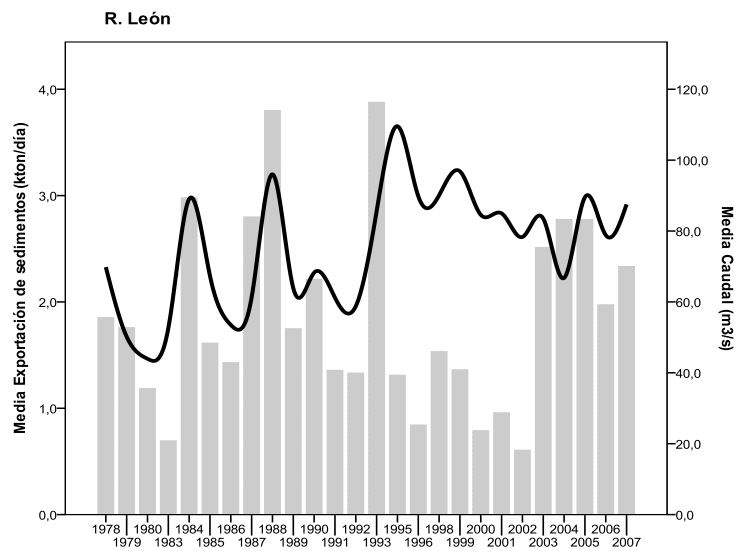
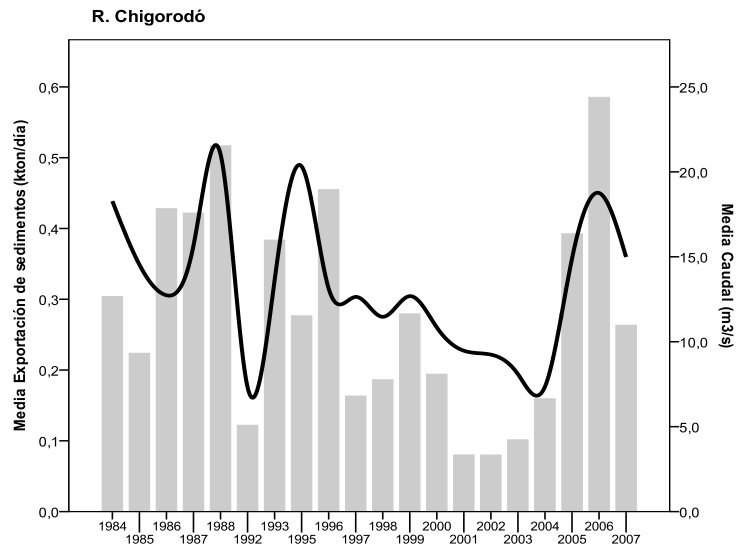
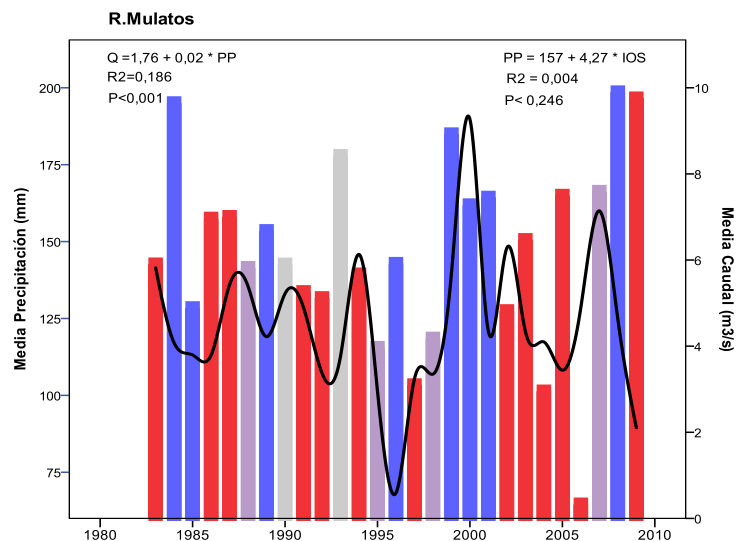


Figura 8: Dinámica interanual de la media anual de exportación de sedimentos (barras) y la media anual del caudal (líneas) en el tiempo en años para cada cuenca hidrográfica del golfo Urabá, organizados de Norte a Sur.

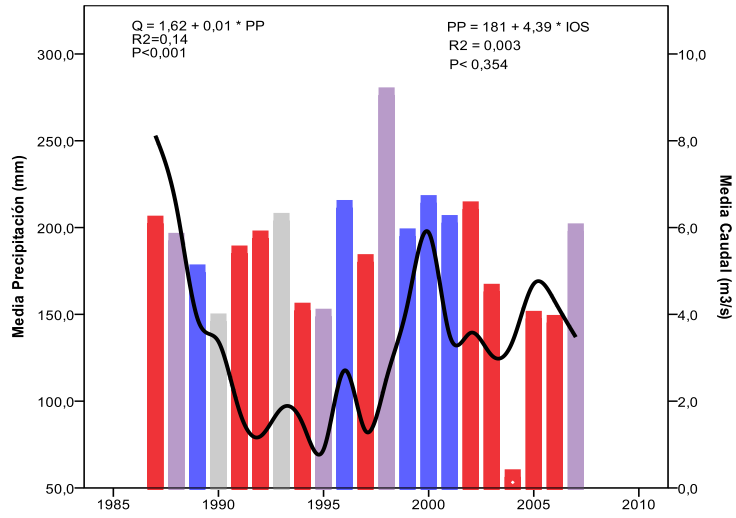
6.3 Influencia de El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) sobre la dinámica interanual del caudal y de la precipitación.

En las gráficas de distribución de precipitación y de caudal, (Figura 9) se observa que el coeficiente de correlación de Pearson es altamente significativo ($P < 0,001$), en todos los ríos. Sin embargo, los coeficientes de determinación muestran una baja proporción en la varianza explicada (Turbo $r^2 = 0,14$; León $r^2 = 0,20$; Apartadó $r^2 = 0,28$; Chigorodó $r^2 = 0,19$; Carepa $r^2 = 0,25$; Mulatos $r^2 = 0,18$; Vijagual $r^2 = 0,32$). Las pendientes muestran que la magnitud de cambio del caudal en relación a la precipitación es baja (Turbo $m = 0,01$; León $m = 0,12$; Apartadó $m = 0,02$; Chigorodó $m = 0,02$; Carepa $m = 0,019$; Mulatos $m = 0,019$; Vijagual $m = 0,0005$).

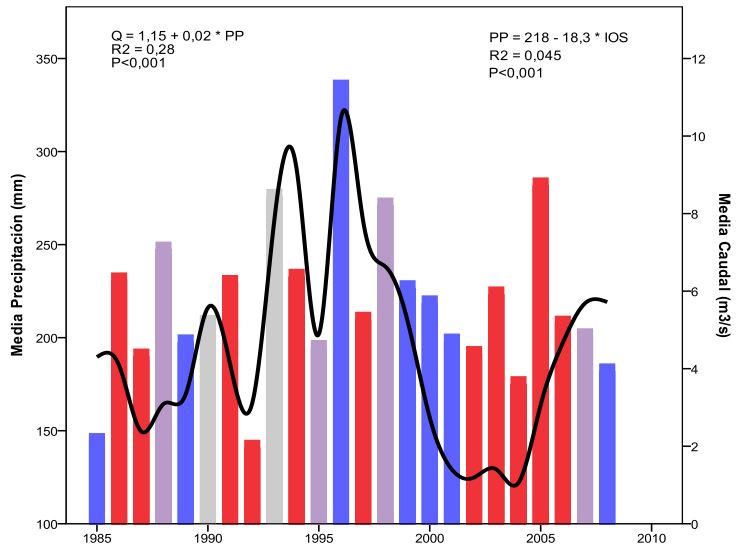
En cuanto a la relación de la precipitación con el IOS (Figura 9), no se vio influenciada por el IOS, en ninguna de las cuencas hidrográficas. En Apartadó, Carepa y Vijagual, se obtuvo un análisis viciado, el análisis de regresión realizado no es útil, debido a que hay una alta dispersión (mirar anexo 3). En estas cuencas se observó una tendencia del valor crítico del IOS en eventos extremos de El Niño y una muy baja precipitación y una muy baja variabilidad.



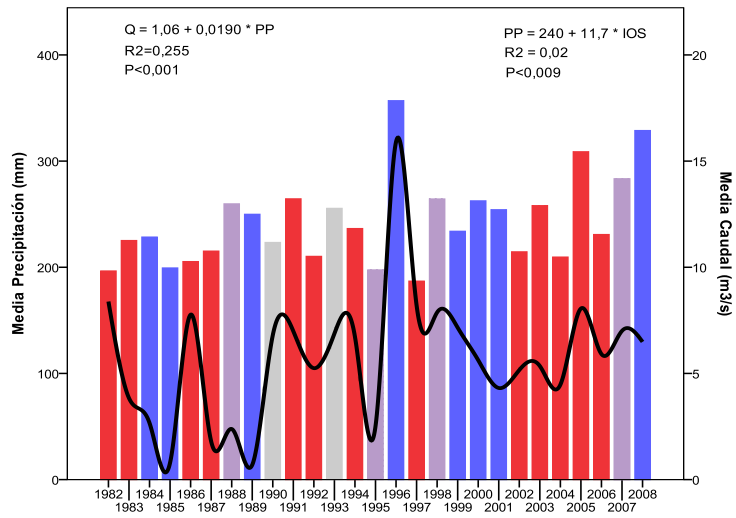
R. Turbo



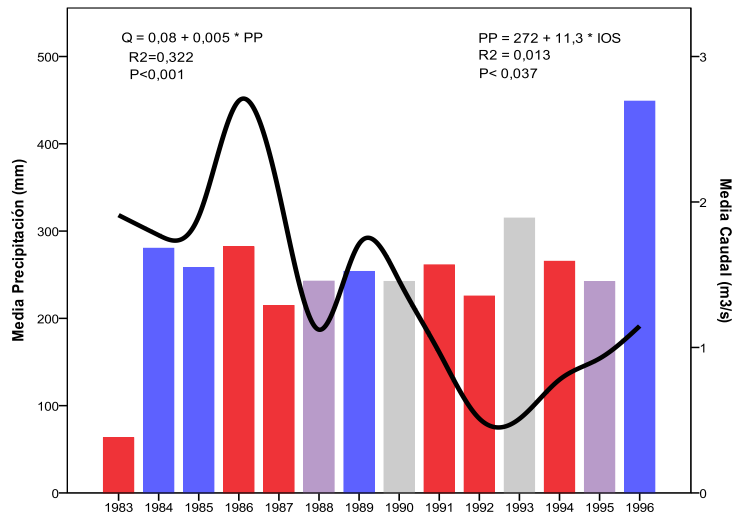
R. Apartadó



R. Carepa



R. Vijagual



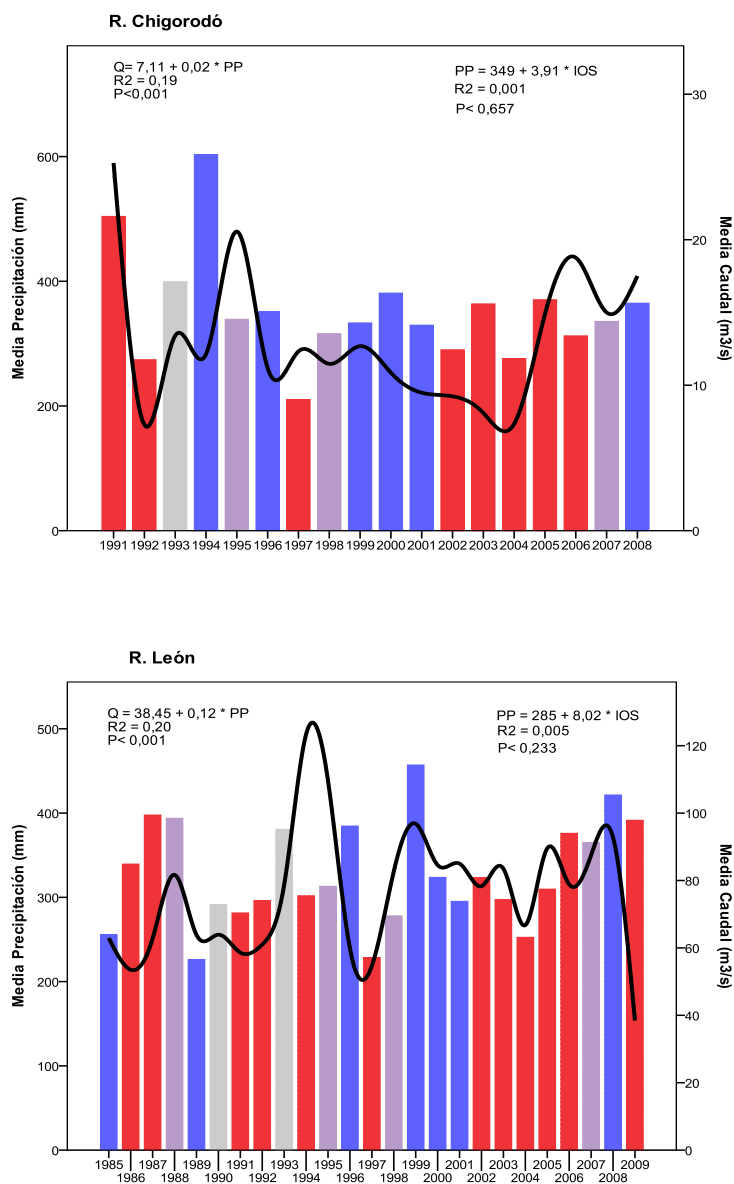


Figura 9: Dinámica multianual de la precipitación (barras) y el caudal (líneas) para cada río. Se muestra la ocurrencia de cada fase del ENOS en color, donde Azul= La Niña y Rojo= El Niño, Lila = año de transición Niño-Niña, Gris = Año normal y la ecuación lineal, el coeficiente de determinación (R^2) y el coeficiente de Pearson para la relación precipitación-caudal y precipitación-IOS, en cada cuenca hidrográfica del golfo Urabá, organizados de Norte a Sur.

En la gráfica 10 se muestra al Índice de Oscilación del Sur (índice de la diferencia en la presión atmosférica al nivel del mar entre Tahití y Darwin) entre los años 1980 y 2010. Los valores altos, por encima de cero corresponden a las anomalías positivas (La Niña) y los valores bajos, por debajo de cero corresponden a las anomalías negativas (El Niño). Se presentaron aproximadamente cinco eventos La Niña en los años 1984-1985, 1988-1989, 1995-1996, 1998-2001 y 2007-2008 y 9 eventos El Niño 1982-1983, 1986-1988, 1991-1992, 1994-1995, 1997-1998, 2002-2003, 2004-2005, 2006-2007, y 2009-2010.

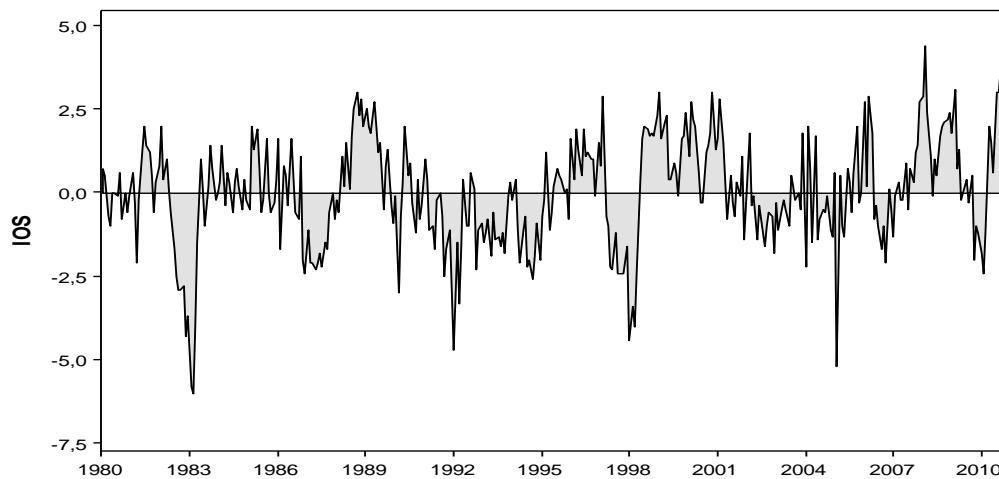


Figura 10: Gráfica del Índice de Oscilación del Sur (Datos tomados del National Weather Service: Climate Prediction Center, 2011)

6.4. Efectos antrópicos: Cambio en el uso y cobertura del suelo

En la tabla 3 se describieron las áreas de bosque pertenecientes al año 1961 para Apartadó, Sur de Apartadó y para Chigorodó y las áreas de bosque en el año de 2005 para Apartadó y Sur de Apartadó, y 2007 para Chigorodó. También se ilustró, el porcentaje perdido de bosque durante los 44 y 46 años estudiados,

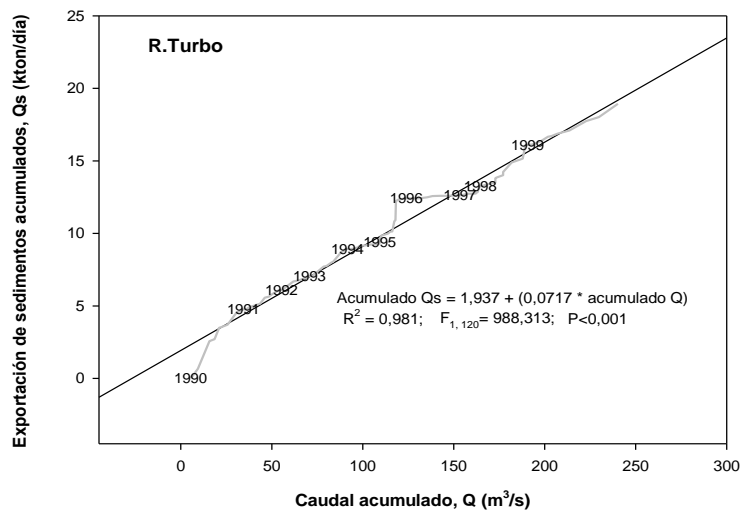
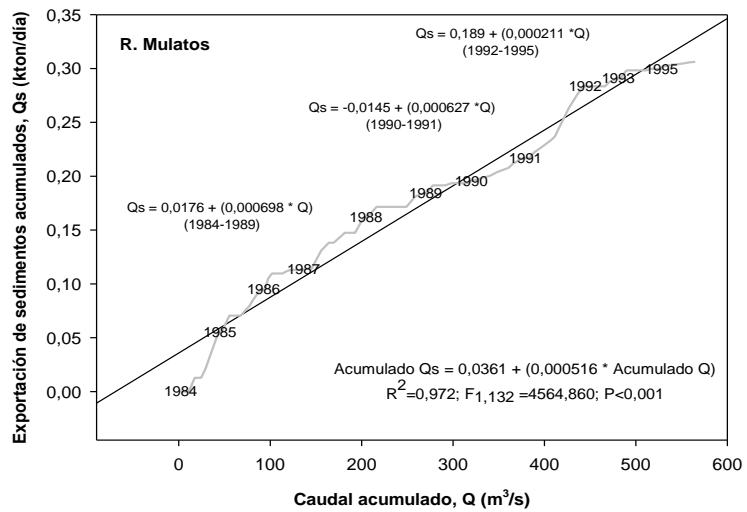
respectivamente. La tasa de deforestación anual fue 0,83% para Apartadó, 1,39% para Sur de Apartadó y 1,9% para Chigorodó. En el Anexo 2 se muestran, las fotografías aéreas, con sus respectivos polígonos que delimitan el bosque y otras coberturas. Se pudo observar que en Apartadó el bosque fue transformado en extensas plantaciones de banano, y en Chigorodó fue convertido en potreros.

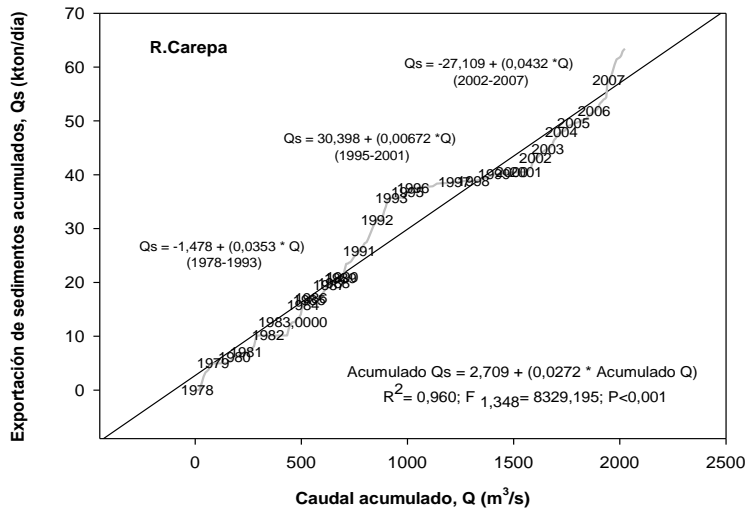
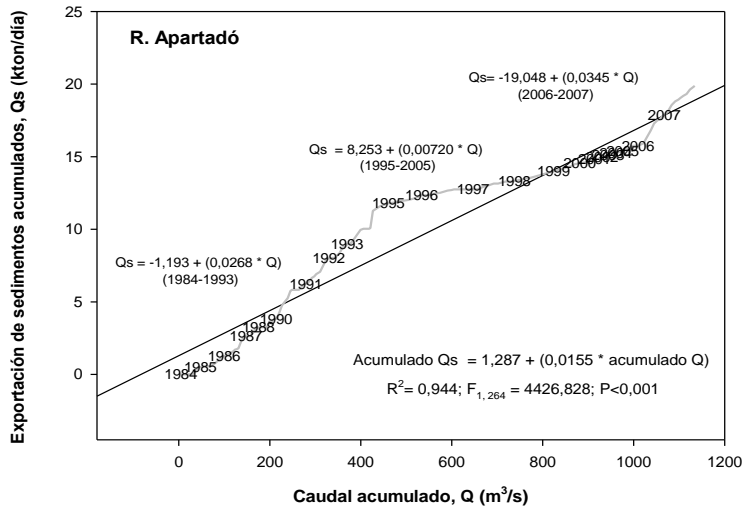
Tabla 3: Áreas y porcentajes de bosque y de otras coberturas, en los años de 1961, 2005 y 2007, en varios cuadrángulos en los municipios de Apartadó y Chigorodó

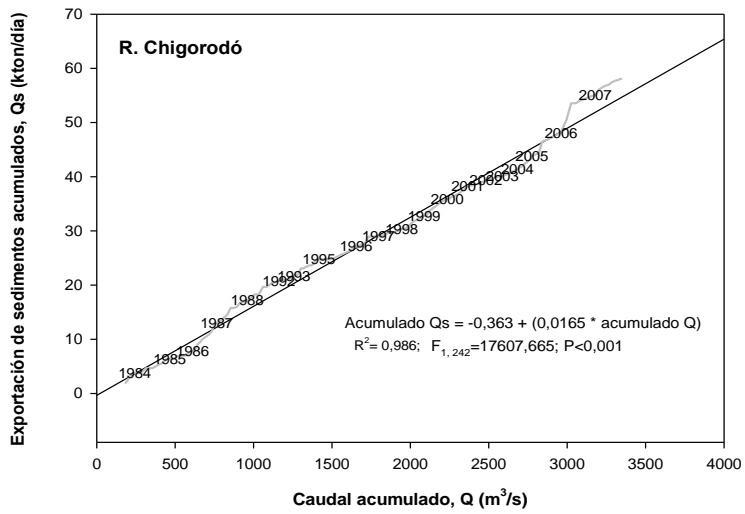
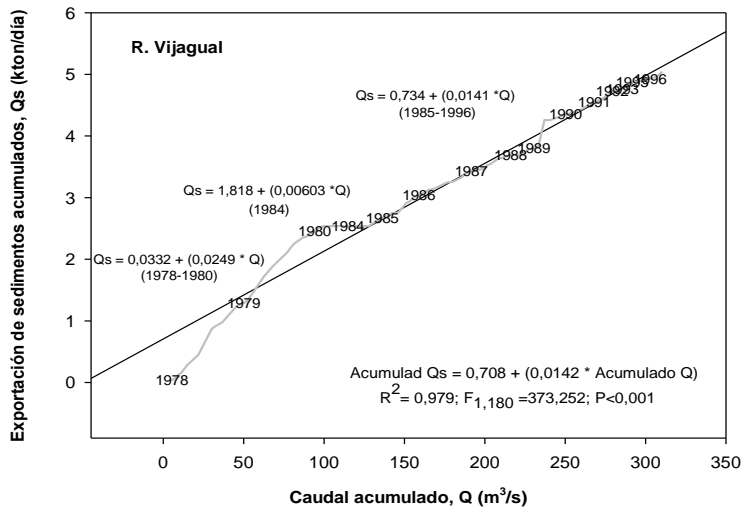
| Municipio | Año | Área Total (km ²) | Área Bosque (km ²) | Área otras coberturas (km ²) | Bosque Actual (%) | Bosque perdido (%) | Tasa deforestación anual (%) |
|-----------------|------|-------------------------------|--------------------------------|--|-------------------|--------------------|------------------------------|
| Apartadó | 1961 | 6,25 | 6,04 | 0,21 | 62,36 | 37,64 | 0,86 |
| | 2005 | 6,25 | 3,53 | 2,72 | | | |
| Sur de Apartadó | 1961 | 6,25 | 5,66 | 0,6 | 38,52 | 61,48 | 1,40 |
| | 2005 | 6,25 | 2,33 | 3,9 | | | |
| Chigorodó | 1961 | 25 | 13,2 | 11,8 | 9,54 | 90,46 | 1,97 |
| | 2007 | 25 | 1,3 | 23,74 | | | |

En las gráficas de doble masa del caudal y la exportación de sedimentos acumuladas solo en el río Turbo y en el río Chigorodó no se presentaron puntos de corte en la línea de regresión, no hay un cambio significativo en la pendiente de las rectas. Es decir, se dio una misma tendencia en la exportación de sedimentos con respecto a la producción de caudal. Para los ríos León, Apartadó, Carepa, Mulatos y Vijagual se presentaron dos cortes en la línea de regresión formándose tres pendientes diferentes, sugiriendo tres periodos con tendencias diferentes de exportación de sedimentos. En León la primera se formó entre los años 1979-1993 ($m_1= 0,0257$), la segunda entre 1995-2003 ($m_2=0,0117$) y la tercera entre 2004-2007 ($m_3=0,0298$). En Apartadó se observó entre 1984-1993 ($m_1=0,0268$), entre 1995 y 2005 ($m_2=0,00720$) entre 2006 y 2007 ($m_3=0,0345$). En Carepa, de igual, entre 1978-1993 ($m_1=0,035$), otra entre 1995-2001 ($m_2= 0,006$) y por último otra entre el 2002-2007 ($m_3= 0,0432$). En Mulatos se presentaron las pendientes entre

1984-1989 ($m_1 = 0,0007$), entre 1990-1991 ($m_2 = 0,0006$) y entre 1992 y 1995 ($m_3 = 0,0002$). En Vijagual desde 1978-1980 ($m_1 = 0,025$), una 1984 ($m_2 = 0,0006$) y entre 1985-1996 ($m_3 = 0,0141$).







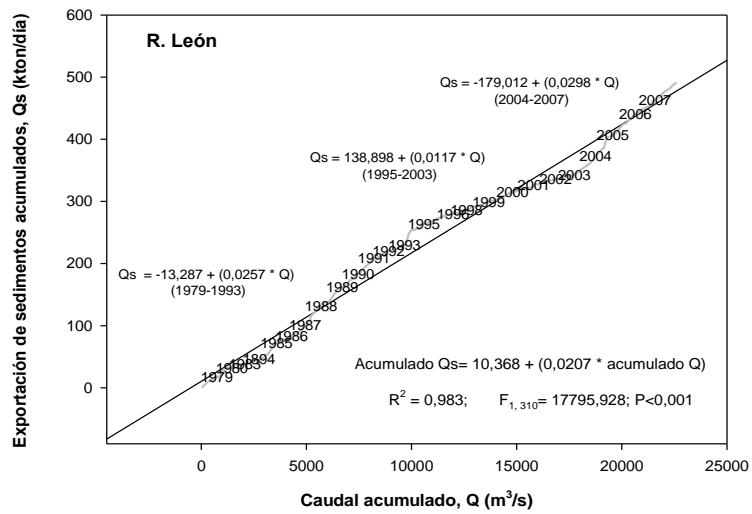


Figura 11: Gráficas de doble masa entre el valor acumulado del caudal y el valor acumulado de la exportación de sedimentos, mostrando la ecuación de la recta para relación general y para cada una de las pendientes formadas en cada punto de corte en los ríos, de cada cuenca hidrográfica del golfo Urabá, organizados de Norte a Sur.

7. DISCUSIÓN

7.1. Variabilidad intra- e inter-anual.

En el análisis de varianza intra-anual para la precipitación, el caudal y la exportación de sedimentos, todos los ríos excepto Turbo para la exportación, tienen una alta diferencia significativa, mostrando una alta variabilidad durante los meses del año. Se observa el ciclo monomodal de la precipitación que se registra en esta zona del país, en donde el período de lluvias comprende, en condiciones normales, entre Mayo y Noviembre (2500mm/ mes en Noviembre) y un período seco desde Diciembre hasta mediados de Abril (100mm/mes en Febrero) (García et al. 2007). En todas las cuencas hidrográficas estudiadas las medias máximas más altas de precipitación, se registraron precisamente entre los meses de Mayo y Diciembre, y los valores más bajos de la media se registraron entre Enero y Abril, siendo el mes Febrero y Marzo los meses que suelen registrar los valores más bajos (CORPOURABA, 2009a; CORPOURABA, 2009b). Esto se debe a que el golfo de Urabá se encuentra ubicado en una franja de baja presión llamada Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) en donde en época lluviosa las corrientes de los vientos Alisios del sudeste que entran al país por la costa chocoana, son dirigidos por la cuenca del río Atrato en dirección norte-sur hacia el golfo de Urabá. En época seca la ZCIT se desplaza oscilante alrededor del ecuador en una posición septentrional en el océano Pacífico desde finales de Diciembre hasta principios de Abril ocasionando en estos meses de baja precipitación (García et al.2007; Hermelin, 2006). En la variabilidad del caudal, de igual manera se observa una alta diferencia significativa, mostrando una alta variabilidad durante los meses del año, coincidiendo con la variabilidad intra-anual de la precipitación (gráficas 1, 2), lo cual muestra la influencia directa que tiene la precipitación sobre el caudal, presentándose el mismo ciclo monomodal y los mismos meses de caudales altos y bajos. En la variabilidad intra-anual de la exportación de

sedimentos se observa el mismo patrón de comportamiento, que en las dos variables anteriores, confirmando la relación directa que existe entre estas variables, ya que a medida que el caudal aumenta el sistema se vuelve más eficiente y más competente para transportar los sedimentos (Restrepo, 2005). A diferencia de los demás tributarios, el río Turbo, no presenta diferencias significativas en la exportación de sedimentos intra-anual, lo cual no quiere decir, que no haya variabilidad en la exportación de sedimentos durante los meses del año y que esta no se vea afectada por las fluctuaciones del caudal, sino, más bien podría indicar que la extensión de la serie de tiempo para este análisis no es suficientemente extensa para distinguir diferencias significativas.

En cuanto a la variabilidad inter-anual para la precipitación solo en los ríos León y Chigorodó se presentaron diferencias significativas, mostrando una alta variabilidad durante los años estudiados. Pero por otro lado, las demás cuencas hidrográficas no muestran variabilidad posiblemente debido a que la precipitación de la zona no se ve afectada por eventos climáticos extremos o diferentes a los ocurridos normalmente durante el año.

De otro lado, el caudal y la exportación de sedimentos si tienen una diferencia significativa inter-anual alta, lo cual se deba, no tanto a la influencia de la precipitación o del clima de la zona, sino más bien, puede ser el reflejo de otro tipo de factores como los antrópicos y las contribuciones que pueden generar las actividades humanas a los ecosistemas, reflejándose en la alta variabilidad, como se explicará más adelante.

7.2. Relación entre exportación de sedimentos y caudal

El análisis de regresión entre el caudal y la exportación de sedimentos mostró una relación lineal directa y estadísticamente significativa. Esto quiere decir que por lo general al haber un incremento en el caudal ocurrirá un aumento en la exportación

de sedimentos. Si se analizan las gráficas de regresión, se observa algunos puntos en los cuales hay un nivel de exportación de sedimentos muy alto en relación a un caudal bajo, lo que ocasiona que el coeficiente de determinación, que indica la variabilidad de la exportación de sedimentos con respecto a la magnitud del cambio del caudal, tenga un valor relativamente bajo inferior al 0,32 en los ríos de Turbo, León, Apartadó, Chigorodó y Carepa, lo cual evidencia que la variación en la magnitud en el caudal influye menos de un 32% en la exportación de sedimentos en cada río y más de un 68% es explicado por otros factores como factores antrópicos y climáticos irregulares (Blanco, enviado), además, puede influir la geología y tectónica de la cuenca (Walling y Fang, 2003), ocasionando un aumento significativo de la exportación de sedimentos hacia los ríos, que por acción de la escorrentía y un aumento en la erosión por eventos fuertes en la precipitación provoca estos valores de sedimentos tan altos en ciertos períodos de tiempo. Solo en el río Mulatos y Vijagual el cambio en la magnitud del caudal explica más del 50% la variabilidad de la exportación de sedimentos.

Los impactos ocasionados por los factores antrópicos y climáticos afectan más la exportación en los ríos de tamaño pequeño que en los ríos más grandes, esto se debe a la “capacidad de modulación” que tiene las cuencas de mayor tamaño (Restrepo, 2005). Esto se explica, ya que los ríos pequeños tienen un área de la cuenca más pequeña para almacenar los sedimentos exportados por eventos climáticos (por ejemplo: por inundaciones) y son más propensos a responder más rápidamente a estos eventos en contraposición con los ríos grandes, que por lo general, tienen extensas llanuras de inundación y deltas en donde la mayoría de los sedimentos pueden ser almacenados (Farnsworth y Milliman, 2003).

Al comparar las pendientes de la ecuación de la línea recta entre el río Turbo y el río León, en donde la pendiente de Turbo es aproximadamente tres veces mayor, mostrando que la erosión de la cuenca al paso de cada metro cúbico (m^3) de agua, (caudal) es mayor en el río Turbo que en río León, que a su vez es 80% más grande (León 700 km^2 ; Turbo = 160 km^2), y además recorre casi toda la

extensión de la planicie costera de Urabá recibiendo las aguas de diferentes tributarios entre ellos los ríos Apartadó, Chigorodó, Carepa que tienen un área similar o igual a la del río Turbo (Apartadó = 160 km²; Chigorodó = 100 km²; Carepa = 150 km²) y Vijagual (40 km²) (Restrepo y Kjerfve, 2002). De igual forma, si comparamos las pendientes de el río León con el río Mulatos (m= 0,001), el cual tiene un área de 1200 km², siendo un 60% más grande, vemos que la erosión de la cuenca del León es mucho mayor que la erosión de Mulatos, que en su desembocadura hay gran concentración de depósitos marinos que forman playas relativamente amplias en la boca del río (Plan de desarrollo-Necoclí 2008-2011).

Conviene distinguir que aunque las pendientes de Apartadó, Chigorodó, Carepa y Vijagual al ser comparadas con la pendiente del río Turbo no tiene una magnitud similar, por lo cual, es posible que los factores que controlan la descarga de sedimentos en los ríos como son la topografía, morfología de la cuenca, cantidad de erosión, la magnitud de la actividad humana y de la precipitación (Farnsworth y Milliman, 2003; Milliman y Syvitski, 1992), se reflejan de manera diferente en cada río, dependiendo de su historia y agentes que influyen sobre la cuenca de manera directa o indirecta.

Con respecto a las gráficas de distribución anual de la exportación en relación y del caudal, las tendencias en la distribución de los datos de estas dos variables muestran una relación directa, confirmando la fuerte correlación existente. En los años en que se presenta un incremento en la magnitud del caudal aumenta la exportación y cuando hay una disminución de la magnitud del caudal disminuye la magnitud de la exportación, pero esta relación no es proporcional en algunos de los años de los cuatro ríos, sobre todo a mediados de la década de los 90 y principios de 2000, década en que la expansión de cultivos y producción de banano, tuvo un rápido crecimiento en la región (Blanco, 2009).

7.3. Relación entre el caudal, la precipitación y El Niño-Oscilación del Sur (ENOS)

Dinámica del caudal y de la precipitación:

La lluvia es fundamental en la formación de los ríos, parte del agua proveniente de la atmósfera en forma de lluvia se infiltra en la tierra, penetra en los suelos y gran parte de esta se evapora, otra parte es absorbida por la vegetación y otra es arrastrada formando la escorrentía. El exceso de agua en este balance hidrológico es lo que forma los ríos en un lugar determinado (Hermelin, 2006). Este comportamiento refleja la fuerte relación que existe entre los patrones de precipitación a escala locales o a lo largo de toda la cuenca hidrográfica y el del caudal de un río.

El golfo de Urabá no es ajeno a este comportamiento natural, ya que la cuenca del golfo de Urabá drena el 32% de la superficie del Departamento de Antioquia y está formada por las sub-cuencas del río Atrato y de la serranía de Abibe (Hermelin, 2006) (en donde nacen los ríos Turbo, Apartadó, Chigorodó, Carepa, Vijagual y Mulatos) y cuenta con una precipitación promedio relativamente alta entre 2500 y 3000 mm al año (IGAC, 2007). Esta relación directa entre la precipitación y el caudal se refleja en el significativo coeficiente de determinación (14-32%). Sin embargo, el resto de la variación no explicada podría ser el reflejo del desacople entre la precipitación y el caudal durante algunos años, posiblemente debido a factores naturales o antrópicos.

Por ejemplo, hay que tener en cuenta la geología de la cuenca hidrográfica, la cual dependiendo del tipo de material del que este conformado el suelo puede favorecer un aumento del caudal por escorrentía o por inundación. Los suelos en donde se encuentran las cuencas hidrográficas de Turbo, León, Apartadó, Chigorodó, Carepa, Mulatos y Vijagual son clasificados depósitos recientes de Cuaternario (Holoceno), lo que implica una conformación principalmente de Arcillas, Arenas y Gravas (IGAC - INGEOMINAS, 2001) y se agrupan como

Terrazas Aluviales para los suelos de las cuencas hidrográficas de Turbo, León y Apartadó, Carepa y Vijagual y Aluviales para Chigorodó y Mulatos, lo que les da la característica de ser llanuras de inundación sujetas a inundaciones periódicas (IGAC - INGEOMINAS, 2001). En estas planicies podrían darse tasas de infiltración relativamente altas, causando un desacople entre la precipitación y los caudales (Black, 1996). Además, hay que tener en cuenta, que el comportamiento del caudal también puede ser explicado por los factores antrópicos (explicados más adelante), como la deforestación afectando la evapotranspiración, aumentando el nivel del caudal, y procesos atmosféricos aperiódicos como sistemas estacionarios de baja presión a mesoescala y sistemas ciclónicos del Caribe. La influencia del fenómeno del ENOS se explicará a continuación.

Influencia de El Niño-Oscilación del Sur (ENOS):

Los cambios en el clima se manifiestan de diferentes maneras como cambios en las temperaturas, en la precipitación y en la evaporación. El ciclo hidrológico tiene la capacidad de asimilar pequeños cambios en el clima, proporcionando un equilibrio climático, pero los cambios grandes que ocurren durante un período de tiempo largo pueden perturbar este equilibrio (Farnsworth y Milliman, 2003). Estos cambios pueden ser, por ejemplo, el fenómeno ENOS, el cual causa alteraciones climáticas a diferentes escalas espaciales regionales y/o locales provocando, entre otras cosas, desplazamientos de los vientos Alisios, de la ZCIT, aumento y disminuciones de las temperaturas del océano Pacífico, cambios en las corrientes oceánicas y altas o bajas precipitaciones dependiendo de la región y etapa en que se encuentre el fenómeno (evento calido, El Niño o evento frio, La Niña) (Philander, 2004).

En Colombia la hidroclimatología inter-anual es fuertemente influenciada por las fases extremas del ENOS en varios ríos del país, en donde se ha demostrado que

durante el Niño produce una baja precipitación ocasionando un efecto de caudal bajo en los ríos, y por lo general sus efectos son más fuertes en el occidente del país. Durante la Niña se produce el efecto contrario, con precipitaciones muy intensas y crecidas del caudal (Poveda, 2004). En las cuencas del río Magdalena y del Cauca, el Niño resulta en una relativa sequía y durante la Niña se presentan excesivas lluvias. Al realizar regresiones entre la descarga de agua y el IOS, se ha encontrado que en varios ríos de sur América como en el Amazonas, el Paraná y el Sao Francisco, que el IOS explica aproximadamente un 42% de la variabilidad de la descarga (Restrepo y Kjerfve, 2000).

Al contrario de lo que ocurre en el resto del país, en el golfo de Urabá no se ve una fuerte influencia del ENOS, ya que en ninguna de los ríos estudiados se encontró un valor de R^2 alto que permitiera concluir que el IOS explica la variabilidad de la precipitación en las cuencas hidrográficas del golfo, además en todas las cuencas las pendientes son muy altas, lo que explicaría que la magnitud del cambio de la precipitación es mucho mayor que la magnitud de cambio del ENOS.

En conclusión, es posible que la variabilidad del caudal con respecto a la precipitación observada se deba a la influencia de factores climáticos naturales normales del comportamiento climático de la región, como el desplazamiento de la ZCIT y/o por la interacción de los vientos del Chorro del Chocó con los vientos Alisios sobre la cordillera occidental provocando una alta pluviosidad sobre el occidente de Antioquia (Hermelin, 2006).

7.4. Efectos antrópicos: Cambio en el uso del suelo

La conversión de bosques a tierras agrícolas, en este caso extensas plantaciones de plátano, banano, y a tierras de pastoreo, parecen promover la alta producción de sedimentos (propuesto por Blanco, 2009 y enviado) que a su vez son

facilmente transportados por la escorrentía producida por el riego de cultivos con agua subterránea en épocas de largas sequías y por la escorrentía producida por precipitación en ciertas pocas de año, (CORPOURABA, 2009b). De hecho, recientemente se ha propuesto que los ríos de golfo de Urabá presentan uno de los niveles de producción de sedimentos más altos de la región Caribe (Blanco, enviado).

La deforestación es un cambio en la cobertura vegetal en los ecosistemas naturales, que trae consigo graves efectos a las regiones tanto a escala local (aumento en la escorrentía) como a escala global (disminución de la evapotranspiración) (Allen y Barnest, 1985; D'Almeida et al. 2006). Por lo general, las mayores tasas de deforestación se presentan en áreas tropicales y se ha observado una disminución progresiva en países de zonas templadas y en economías emergentes (FAO, 2011). Esa pérdida de cobertura vegetal se debe al rápido crecimiento poblacional, a la expansión de tierras para el cultivo, la ganadería, expansión minera, extracción de leña, entre otras (FAO, 2011; Etter et al. 2006b).

En América Latina y el Caribe gran parte de su territorio se encontraba, para el 2010, cubierto de bosques, casi el 46% de su territorio con 891 millones de hectáreas, aproximadamente el 22% de los bosques del mundo. En América del Sur se ha producido una pérdida de más de medio millón de hectáreas por año en las últimas dos décadas (1990-2010), con un porcentaje de cambio anual de 1,97% (1990-2000) y 3,23% (2000-2010) (FAO, 2011).

Colombia tiene un gran desarrollo agrícola viéndose gravemente afectado por la deforestación masiva de sus bosques naturales para el sembrado de cultivos, estimándose 126.493 has o el 32% del área del país ha sido deforestado para este fin (Etter et al. 2006a), poniendo al país con una de las más altas tasas de deforestación anual de todo América del Sur (1,5 a 4,5 entre los años 1940 al 2000) (Etter et al. 2006b). Las regiones Andina y Caribe son las dos regiones del

país con la mayor cantidad de tierra cultivada con 3.006.996 has y 1.083.044 has, que representan el 60% y el 22% del área nacional, respectivamente (Etter et al. 2006a). Para la cuenca del río Magdalena, Restrepo (2005) registró una tasa de deforestación anual entre los años 1970 y 1990 de 1,9%.

Por ende el golfo de Urabá, no es ajeno a estas altas tasa de deforestación, que para el municipio de Apartadó se registró entre los años de 1961 al 2005 una tasa entre 0,85 y 1,39 %, y para el municipio de Chigorodó entre 1961 al 2007 una tasa de 1,9%, siendo las tasas más altas registradas para el golfo de Urabá, en los últimos tiempos, y en comparación con la tasa de deforestación de Sur América podría ser, en conjunto con la de la cuenca del río Magdalena, importante en el panorama mundial (Restrepo, 2005).

Estas tasas de deforestación tan altas se deben a la extensiva deforestación que ha sufrido esta región del país a causa del desarrollo agropecuario (Blanco, enviado), de grandes extensiones de cultivos de banano y plátano, cubriendo el 73% del área total del golfo (Blanco, 2009), registrándose los municipios con más actividad bananera los municipios de Apartadó, Carepa, Chigorodó y Turbo, siendo este último el que presenta la producción agrícola más tecnificada e intensiva (García et al. 2007). Para la Cuenca del río Turbo se ha registrado que la extensa siembra y producción de banano y plátano a ocasionado la deforestación de los bosque naturales (71,3ha), manglares (11,3ha) y de pastos (286,2ha), en los últimos 40 años (Taborda, 2008).

Estas altas tasas de deforestación tienen una relación directa con el aumento de la exportación de sedimentos hacia los diferentes afluentes del golfo de Urabá. Esta influencia se evidencia en el cambio de las pendientes a lo largo de las líneas de regresión en las graficas de doble masa (Walling y Fang, 2003) en cinco de las siete cuencas estudiadas. Estos cambios ascendentes muestran que la tasa de la exportación de sedimentos fue mayor que la tasa de salida de cada metro cubico (m^3) del caudal en cada río y los valores descendentes explican una tasa menor

de exportación de sedimentos por caudal. Este cambio o alejamientos de las pendientes originales se observan desde mediados de los años 80 y 90, épocas en que el desarrollo de la industria bananera tuvo su apogeo e implementación de políticas y tecnificación (Blanco, 2009; Taborda, 2008)

EFFECTOS DE LA EXPORTACIÓN DE SEDIMENTOS EN LOS ECOSISTEMAS MARINOS

Los ríos y la escorrentía costera son los principales medios por los cuales llegan al mar gran cantidad de contaminantes, afectando gravemente estuarios, manglares, arrecifes y todos los ecosistemas marino-costeros. Los ríos, antes de llegar al mar, reciben las aguas contaminadas de diferentes afluentes que a su vez por escorrentía reciben las aguas con desechos industriales, de la minería, de la ganadería, de la agricultura, y las aguas negras de los desechos humanos, lo cual una parte queda almacenado y otra parte es arrastrado por los ríos que al desembocar en los mares depositan estos desechos.

Por consiguiente, estudios a nivel mundial han documentado cómo los sedimentos, los tipos de estos y la clase de nutrientes arrastrados por las cuencas han causado efectos tan graves en el ecosistema como la muerte de arrecifes, manglares y formaciones de bancos en los estuarios por acumulación de sedimentos (Pinilla et al. 2007; Herrera et al. 2009; Carbonel et al. 2003). Por ejemplo, en los arrecifes coralinos, las altas tasas de exportaciones de sedimentos ha ocasionando un incremento en la cobertura de cierto tipo de algas y una disminución de macroalgas en estadios tempranos por asfixia, por disminución de nutrientes y por cambios físicos de fondo, impidiendo su establecimiento (Flórez et al. 2010); una disminución de la diversidad, cobertura y abundancia de los corales, esponjas y octocorales, por una acumulación excesiva de sedimentos en los arrecifes, provocando abrasión, daño mecánico, y alta turbidez del agua disminuyendo la intensidad luminosa que penetra al agua y una disminución de la fauna asociada a estos ecosistemas (Herrera et al. 2009) ocasionando finalmente la muerte de los arrecifes coralinos (Alvarado et al. 2005).

Por otro lado, como resultado de la actividad humana los deltas y manglares asociados a la desembocadura de los ríos, se encuentran gravemente amenazados por la contaminación, pesca excesiva, cambio en el uso del suelo, y cambio en la dinámica hidrológica por la acumulación de sedimentos (Majluf, 2002), produciendo una colmatación del sistema aumentando la formación de bancos arenosos y áreas de bajos (zonas sin mangles) por la acumulación de limos y arcillas, provenientes de los ríos, lo que tienen en grave peligro de extinción a estos ecosistemas (Carbonell et al. 2003) y además se ha documentado un aumento en las concentraciones de metales almacenados en los manglares, sobre todo del Plomo (Pb), de Cadmio (Cd) y de Zinc (Zn), provenientes de los agroquímicos utilizados para la fumigación de los cultivos (Parra y Espinosa, 2007; Praveena et al. 2007).

En Colombia la explotación tradicional del banano consume principalmente fertilizantes, fungicidas, herbicidas, nematicidas, plásticos y madera provocando un impacto ambiental tan grave como la erosión y contaminación del suelo, del aire, de las aguas de los ríos y manglares alterando las condiciones físicas y químicas normales de estos recursos (BVSDE, 2010). Si se tiene en cuenta que en el golfo de Urabá es una zona del país que presenta altos índices de precipitación la cual lava y arrastra las partículas de agroquímicos suspendidos, cuenta con un rico sistema de drenaje que recibe todas las aguas contaminadas utilizadas en los cultivos, y es la zona del país en que más se produce banano y plátano, produciendo una alta deforestación de sus manglares y bosques (BVSDE, 2010), es evidente que el efecto producido por todas las actividades humanas generadas de la extensiva siembra, ha provocado y continuará provocando un efecto bastante grave en el ecosistema marino del golfo, que precisamente se puede ver más afectado que otras zonas marinas del país, debido a su condición de golfo ya que es una zona de interface entre aguas dulces y saladas presentando poco movimiento de estas haciéndolo más sensible a los efectos contaminantes (Escobar, 2002), teniendo un mayor almacenamiento de

sedimentos, afectando los manglares, humedales y que son arrastrados por las corrientes a los arrecifes coralinos provocando pérdida de biodiversidad y muerte de las especies de mangle y corales presentes en el golfo. Hay que tener en cuenta que los bosques de manglar ocupan el 0,6% del área del golfo y que tiene y una extensión de 3,5 km² de arrecifes coralinos (Garcia et al. 2007) los cuales, si siguen las condiciones hasta ahora descritas en deforestación, aumento en la tasa de exportación de sedimentos, aumento en las hectáreas de cultivos y de todas las actividades humanas que se generan por esta actividad, es muy posible que se extingan, ocasionando no solo la pérdida de bosque, de manglares y arrecifes, sino también de fauna y flora que serían imposibles de recuperar lo cual sería una catástrofe natural para el golfo.

8. CONCLUSIONES

En la variabilidad estacional intra-anual, en donde se registró una alta diferencia significativa de la precipitación, del caudal y de la exportación de sedimentos, se evidencia en primer lugar, la fuerte influencia que tiene el comportamiento de la ZCIT, los vientos Alisios y posiblemente el Chorro del Chocó sobre la precipitación del golfo, y cómo esta variación en la precipitación tiene un efecto directo sobre el caudal de las diferentes cuencas y cómo esto afecta la magnitud de la exportación de sedimentos en cada río, confirmando la fuerte relación existente entre estas variables, aceptando la primera hipótesis planteada en este estudio.

En la variabilidad inter-anual, la precipitación no tuvo una diferencia significativa alta en todas las cuencas, evidencia que la precipitación sí presenta un ciclo monomodal anual, y que en el golfo la precipitación no se ve afectada al presentarse eventos climáticos regionales con el Fenómeno de El Niño y de la Niña. Con respecto a la alta variabilidad presentada por el caudal y la exportación de sedimentos es posible que factores distintos al clima sean los causantes de estos resultados, como los factores antropicos. Pero pocos estudios se han efectuado para analizar cómo la intervención humana ha afectado las magnitudes del caudal y la exportación de sedimentos hacia las cuencas, por lo cual es importante generar este tipo de estudios más a fondo, como análisis temporales de series de tiempo más antiguas, más largas y continuas en el tiempo para así poder establecer mejor los efectos humanos.

Las relaciones entre la exportación de sedimento y el caudal, y las relaciones del cambio en la magnitud del caudal con el cambio en la precipitación, son dos relaciones bastante fuertes. Pero en el golfo de Urabá, poco se ven influenciadas por el Fenómeno El Niño-Oscilación del Sur, que al parecer, en la zona, no genera ningún efecto evidente en el cambio en las precipitaciones, al contrario del resto del país en donde sí varían ocasionando evidentes cambios en el caudal y

en la exportación de sedimentos y generando graves consecuencias económicas y sociales al país. Estos resultados no eran esperados y rechazan la segunda hipótesis propuesta.

Es evidente que la deforestación en el golfo de Urabá es una de las más altas y aceleradas del país, debido por la alta producción bananera de la región, lo cual ha generado graves impactos ambientales y un aumento significativo de la exportación de sedimentos a los ríos de la zona y posiblemente una acelerada eutrofización de los sistemas acuíferos de la región, corroborando la tercera hipótesis. Por lo anterior, es importante generar políticas urgentes respecto al uso sostenible de los recursos naturales de la región y tomar medidas que regulen la alta deforestación y proteja los ecosistemas marinos presentes en el golfo.

9. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Allen, J, Barnest, D. 1985. The Causes of Deforestation in Developing Countries. *Annals of the Association of American Geographer.* 72: 163- 184

Biblioteca virtual de desarrollo sostenible y salud ambiental –BVSDE-
[Internet] 2010 Los desechos generados por la industria bananera en Colombia. *Organización Panamericana de la Salud.* Fecha de acceso: 2011 Marzo 17. Disponible en: <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/acodal/xxix.pdf>

Black, PE. 1996. Watershed Hydrology. Second Edition. Syracuse, New York (U.S.A). State University of New York. College of Enviromental Science and Forestry. Lewis Publishers. p. 449.

Blanco, JF. 2009. Banana Crop Expansion and Increased River-borne Sediment Exports to the Gulf of Urabá, Caribbean coast of Colombia. *Ambio* 38: 02-06.

Blanco, JF. (Enviado). An erosion hotspot in the southwestern Caribbean (Urabá,Colombia): patterns and processes. *Ambio.*

Carbonell F, Gómez E, Torrealba I. 2003. Situación de los manglares: Una síntesis sobre el caso de Costa Rica. Documento borrador resumen a Diciembre 2002. Investigación sobre los manglares en el Golfo de Nicoya, Puntarenas, Costa Rica. ONG *Meralvis.* Heredia, Costa Rica. Impreso de edición limitada.

Corporación para el Desarrollo Sostenible del Urabá (CORPOURABA). 2009a. Valoración de la calidad del agua por métodos matemáticos en el Río Turbo (regional centro CORPOURABA).

Corporación para el Desarrollo Sostenible del Urabá (CORPOURABA). 2009b. *Calidad del agua superficial en la cuenca hidrologica del río Apartadó.*

Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC), Universidad del Valle (Univalle). 2007. El Río Cauca en su valle alto. Cali, Colombia

D’Almeida C, Charles J, Vörösmarty C, Marengo J, Hurtt G, Lawrence S. Keim B. 2006. A water balance model to study the hydrological response to different scenarios of deforestation in Amazonia. *Journal of Hydrology* 331: 125– 136

Eder A, Strauss P, Krueger T, Quinton JN. 2010. Comparative calculation of suspended sediment loads with respect to hysteresis effects in the Petzenkirchen catchment, Austria. *Journal of Hydrology* 389: 168–176

Escobar J. 2002. La contaminación de los ríos y sus efectos en las áreas costeras y el mar. División de Recursos Naturales. *Naciones Unidas.*

Etter A, McAlpine C, Wilson K, Phinn S, Possingham H. 2006a. Regional patterns of agricultural land use and deforestation in Colombia. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 114: 369–386

Etter A, McAlpine C, Pullar D, Possingham H. 2006b. Modelling the conversion of Colombian lowland ecosystems since 1940: Drivers, patterns and rates. *Journal of Environmental Management* 79: 74–87

- Farnsworth K, Milliman J.** 2003. Effects of climatic and anthropogenic change on small mountainous rivers: the Salinas River example. *Global and Planetary Change*. 39: 53-64.
- Flórez L, Rangel A, Díaz M, Venera D, Díaz G.** 2010. Efecto de la sedimentación en el reclutamiento de las macroalgas *Dictyota spp* y *Lobophora variegata*: un estudio experimental en el Parque Nacional Natural Tayrona, Caribe Colombiano. *Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras – INVEMAR-39:41-56*.
- García, C (Ed).** 2007. Atlas del golfo de Urabá: una mirada al Caribe de Antioquia y Chocó Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras –Invemar– y de Antioquia. Serie de Publicaciones Especiales de Invemar N° 12. Santa Marta, Colombia. 180p
- Gonzales M, García D.** 1998. Restauración de Ríos y Riberas. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes. Fundación Conde del Valle de Salazar. p. 318.
- Gordon DN, McMahon TA, Finlayson BL, Gippel CJ, Nathan RJ.** 2004. Stream Hydrology: An Introduction For Ecologist. Second Edition. John Wiley & Sons, Ltd.
- Hermelin M.** 2006. Geografía de Antioquia. 1° ed. Medellín Colombia: Fondo editorial Universidad EAFIT. p. 338.

Herrera A, Betancourt L. Alcolado P. 2009. Impacto de la contaminación sobre los arrecifes coralinos al Oeste del Río Haina, San Cristóbal, República Dominicana. Reporte del Proyecto EcoMar: Impactos a los arrecifes dominicanos. p. 16

Instituto Geografica Agustin Codazzi -IGAC-. 2007. Antioquia: Característica geograficas. Bogotá : Imprenta Nacional de Colombia.

Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), Instituto Colombiano de Geología y Minas (INGEOMINAS). 2001. Investigación integrada del Anden Pacífico colombiano, Tomo 1: Geología, Mapas.

Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), Instituto Colombiano de Geología y Minas (INGEOMINAS). 2001. Investigación integrada del Anden Pacífico colombiano, Tomo 1: Geología. Colombia

Larsen MC, Webb MT. 2009. Potential Effects of Runoff, Fluvial Sediment, and Nutrient Discharges on the Coral Reefs of Puerto Rico. *Journal of Coastal Research.* 25: 189-208

Lugo AE, Marques FQ, Weaver PL. 1980. La erosión y sedimentación en Puerto Rico. *Caribbean Journal of Science.* 16:143-149

Majluf P. 2002. Proyecto estrategia regional de biodiversidad para los países del trópico Andino” convenio de cooperación técnica no reembolsable ATN/JF-5887/RG CAN-BID. Los ecosistemas marinos y costeros.

- Milliman J, Syvitski J.** 1992. Geomorphic/Tectonic Control of Sediment Discharge to the Ocean: The Importance of Small Mountainous Rivers. *The Journal of Geology*. 100: 525-544.
- McLane M.** 1995. Sedimentology. Oxford University Press, Inc. New York, Oxford
- Montoya LJ, Montoya RD.** 2005. Transporte de sedimentos en las corrientes del departamento de Antioquia. *Revista de Ingenierías Universidad de Medellín* Universidad de Medellín. Colombia. 4: 101-109
- Monsalve SG.** 1995. Hidrología en la Ingeniería. Segunda edición. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería. Bogotá Colombia.
- Morehead MD, Syvitski JP, Huttonb WH, Peckhamb SD.** 2003. Modeling the temporal variability in the flux of sediment from ungauged river basi. *Global and Planetary*. 39: 95-110
- National Weather Service Climate Prediction Center** [Internet]. 2011. Southern Oscillation Index (SOI). Disponible en: <<http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/indices/>>
- Organización de las Naciones Unidad para la Agricultura y la Alimentación (FAO).** 2011. *Situación de los bosques del mundo 2011*.
- Parra JP, Espinosa LF.** 2007. Acumulación de Pb, Cd y Zn en sedimentos asociados a *Rhizophora mangle*, en el río Sevilla, Ciénaga Grande de Santa Marta, Colombia. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* 31: 347-354

- Patrick NJ, Sheridan GJ, Noske PJ.** 2006. Changes in sediment loads and discharge from small mountain catchments following wildfire in south eastern Australia. *Journal of Hydrology*. 331: 495–510
- Philander, SG. 2004.** Our affair with El Niño: how we transformed an enchanting Peruvian current into a global climate hazard. Princeton, New Jersey : Princeton University Press. p. 275.
- Pinilla G, Gutiérrez A, Ulloa U.** 2007. Estudio de la reducción de caudales en el Canal del Dique. Convenio Interadministrativo No 1033 de 2007. Laboratorio e Ensayos Hidráulicos (LEH)-CORMAGDALENA-.
- Poveda G.** 2004. La hidroclimatología de Colombia : una síntesis desde la escala inter-decadal hasta la escala diurna . *Revista Academica Colombiana de Ciencias*. 28: 201-222.
- Poveda G.** 1997. ¿Atractores extraños (CAOS) en la Hidro-climatología de Colombia? *Academia Colombiana de Ciencias*. 21: 431-444.
- Praveena MS, Radojevic M, Abdullah MH.** 2007. The Assessment of Mangrove Sediment Quality in Mengkabong Lagoon: An Index Analysis Approach. *International Journal of Environmental & Science Education*. 2: 60-68.
- Restrepo, JD.** 2005. Sedimentos del río Magdalena: Reflejo de la crisis ambiental. Primera edición. Fondo editorial Universidad de EAFIT. Medellín Colombia.

- Restrepo JD, Kjerfve B.** 2000. Magdalena river: interannual variability (1975–1995) and revised water discharge and sediment load estimates. *Journal of Hydrology*. 235: 137-149.
- Restrepo JD, Kjerfve B.** 2002. River discharge, sediment load, and sediment yield estimates for the Magdalena Rivers of Colombia: environmental implications. *CariBas - Activities in River Catchments and their Impacts on Coastal Systems in the Caribbean*. LOICZ Reports y Studies.
- Richards K.** 2004. Rivers: form and Process in Alluvial Channels. First Edition. The Blackburn Press. Caldwell, New Jersey.
- Smith RL, Smith TM.** 2001. Ecología. Cuarta Edición. PEARSON Addison Wesley. p. 642.
- Taborda A,** 2008. 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 Turbo, CORPOURABA.
- Tallaksen ML, Van Lanen HAJ.** 2004. Hydrological Drought: Processes and estimation methods for streamflow and groundwater. *Elsevier publications*. p. 581
- Universidad del Valle, (Univalle)** [Internet]. 2008. Perfil Municipio de Carepa. Fecha de acceso, 23 de mayo de 2011. Disponible en:

http://prevencionviolencia.univalle.edu.co/observatorios/antioquia/carepa/archivos/perfil_carepa.pdf.

Walling DE. 1999. Linking land use, erosion and sediment yields in river basins. *Hydrobiology*. 410: 223–240.

Walling DE, Fang D. 2003. Recent trends in the suspended sediment loads of the world's rivers. *Global and Planetary Change*. 39: 111– 126

Wall GR, Nystrom EA, Litten S. 2008. .Suspended Sediment Transport in the Freshwater Reach of the Hudson River Estuary in Eastern New York. *Estuaries and Coasts*. 31:542–553

Wang CHA, Chin LS, Gupta A. 2005. Sediment Released to Coastal Waters of Southeast Asia: Seasonal and Spatial Distributions. *Conference on Deltas HO Chi Minh City*

Warne AG, Webb RMT, Larsen MC. 2005. Water, Sediment, and Nutrient Discharge Characteristics of Rivers in Puerto Rico, and their Potential Influence on Coral Reefs. U.S. *Geological Survey Scientific Investigations Report*. 206: 58

