

Comparación de la dinámica de sedimentos suspendidos entre una bahía tropical abierta y una bahía tropical cerrada

Diamilet Pérez Betancourt¹ y Nadja O. Cintrón Franqui²

¹Departamento de Física, ²Departamento de Geología

Universidad de Puerto Rico, Recinto Universitario de Mayagüez

RESUMEN

La dinámica de sedimentos suspendidos asociada a los ríos y costas de Puerto Rico es un tópico que no ha sido explorado completamente. Su estudio es esencial para definir la calidad del agua, lo que conlleva una gran importancia ecológica. El objetivo de esta investigación fue utilizar imágenes del sensor IKONOS para comparar la dinámica de sedimentos suspendidos asociada al Río Culebrinas, que desemboca en una bahía tropical abierta, con la del Río Guayanilla, que desemboca en una bahía tropical cerrada. A pesar de la limitación que supuso la falta de datos de fecha y hora de las imágenes, se pudieron realizar comparaciones cualitativas entre los lugares de estudio. Se utilizó el programa ENVI para procesar y analizar las imágenes aplicando técnicas de clasificación y algoritmos desarrollados previamente. Los resultados demuestran que el plumacho del Río Culebrinas abarca una región mayor que el plumacho del Río Guayanilla. Esto se debe a que la cuenca hidrográfica del Río Culebrinas es más grande que la del Río Guayanilla, además de que tiene un promedio de precipitación y escorrentía mayor. Los sedimentos asociados al Río Guayanilla permanecen más cercanos a la costa adyacente a la desembocadura, lo que se debe a que en una bahía cerrada las corrientes son menos fuertes y a que en el Mar Caribe los patrones de oleaje son más calmados. Este estudio sirve para motivar la realización de otras investigaciones sobre sedimentos suspendidos alrededor de Puerto Rico una vez aumente la disponibilidad de imágenes enfocadas en nuestra región.

Palabras clave: Culebrinas, ENVI, Guayanilla, IKONOS

INTRODUCCIÓN

Trasfondo

La concentración del total de sedimentos suspendidos (TSS) constituye uno de los parámetros de calidad de agua más importantes (Rodríguez-Guzmán et al. 2009), principalmente por estar relacionados a la producción y flujo de metales pesados y microcontaminantes (Ekercin 2007). Estos sedimentos consisten de partículas suficientemente finas para ser transportadas en suspensión por el agua en movimiento (Campbell 2007), como lo son la arcilla, el limo y la arena (Miller et al. 2004). Además de afectar la calidad del agua, el TSS es indicativo de problemas de erosión en las cuencas hidrográficas (Ritchie et al. 1986). Mas aún, el estudio de esta materia, principalmente en regiones costeras, tiene una gran importancia ecológica. Las altas concentraciones del TSS en zonas costeras pueden afectar la productividad del phytoplankton y de la vegetación acuática sumergida, el crecimiento de corales, la dinámica de nutrientes, y el transporte de contaminantes y otros materiales (Miller et al. 2004).

Los sedimentos suspendidos también afectan las propiedades ópticas del agua. En la mayoría de los casos, un aumento del TSS constituye un cambio en el color del agua hacia tonos marrones. Esto se debe a la gran dispersión de las partículas en las regiones roja e infrarroja del espectro electromagnético, y su gran absorción en la región azul (Knaeps et al. 2010). La percepción remota se aprovecha de estas características para estudiar el TSS con miras a evitar los altos costos y la dificultad de la toma de datos de campos. Desde finales de los '70, estudios de sedimentos suspendidos han sido realizados utilizando datos de plataformas satelitales (Ritchie et al. 2001) cuyos sensores miden la cantidad de radiación solar reflejada por la superficie del agua a diferentes longitudes de onda. Actualmente el TSS es uno de los parámetros más exitosamente medidos por medio de la percepción remota (Ekercin 2007).

El uso de esta técnica ha conllevado el desarrollo de algoritmos que transformen los datos derivados de las imágenes de satélite a valores de concentración del TSS. Usualmente, este proceso envuelve el establecimiento de relaciones empíricas entre los datos derivados de las imágenes de satélite y los datos de campo (Rodríguez-Guzmán et al. 2009). Por otra parte, se ha intentado desarrollar algoritmos que puedan ser aplicados a nuevos archivos de datos sin la necesidad de adquirir datos de campo simultáneamente (Knaeps et al. 2010). En fin, de la literatura desarrollada hasta el momento se desprende que el estudio de los sedimentos suspendidos está supuesto a adquirir gran complejidad, lo que va acorde con su gran importancia.

Lugar de estudio

De acuerdo a la disponibilidad de imágenes en las cuales se observara sedimentación, se escogieron el Río Culebrinas, al oeste de Puerto Rico, y el Río Guayanilla, al sur de la isla, para realizar este estudio (Fig. 1).

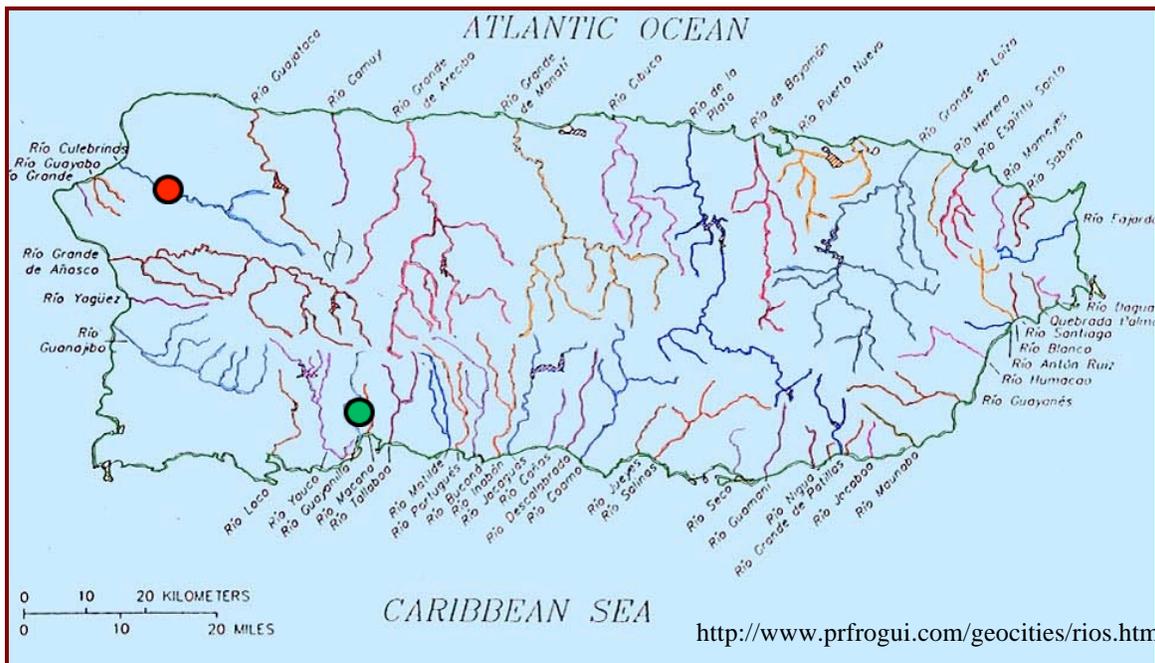


Figura 1. Mapa de los ríos más importantes de Puerto Rico. El círculo relleno de color rojo marca el Río Culebrinas, mientras el círculo relleno de color verde marca el Río Guayanilla.

Contrario a Culebrinas, este río desemboca en una bahía cerrada, la Bahía de Guayanilla. Punta Guayanilla cierra esta bahía por el este, mientras que Punta Verraco la cierra por el oeste.

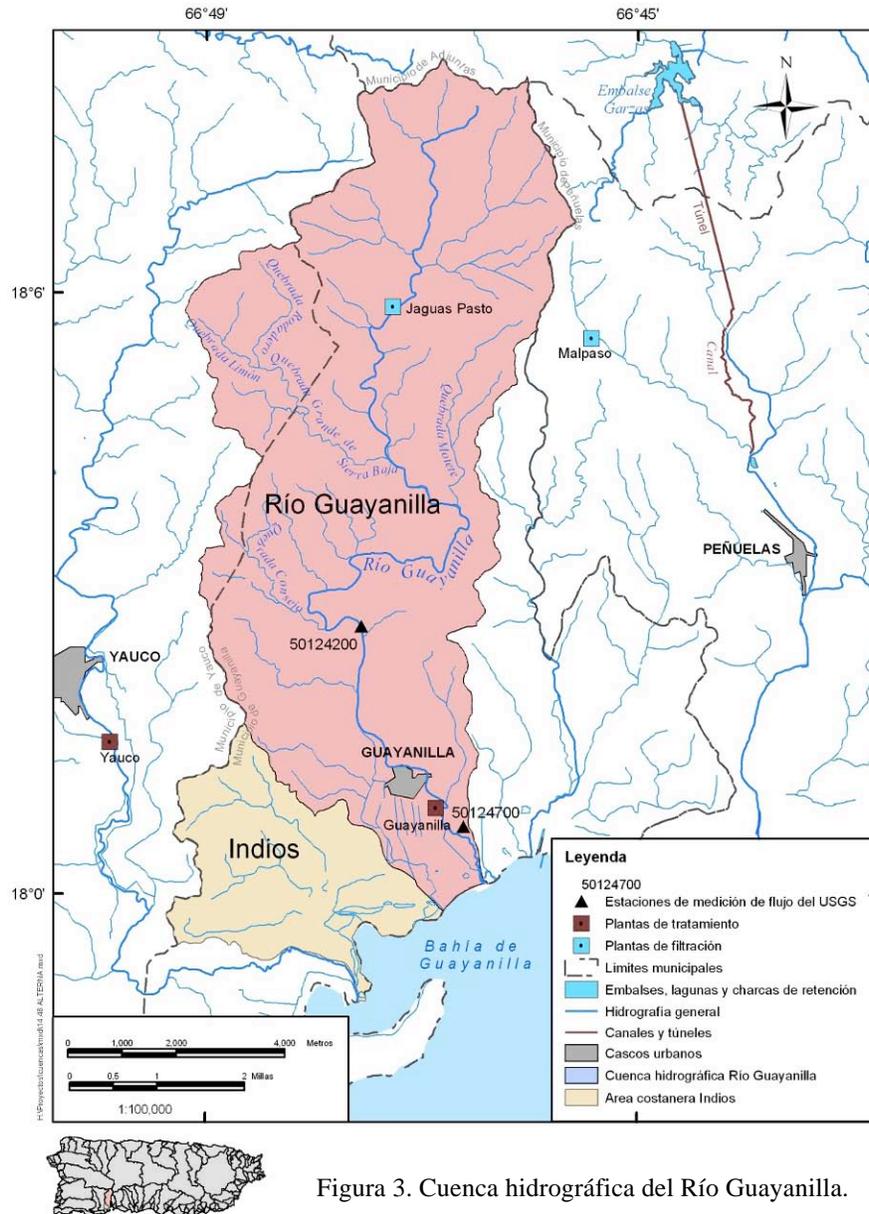


Figura 3. Cuenca hidrográfica del Río Guayanilla.

OBJETIVOS

Esta investigación pretendió estudiar la dinámica del TSS relacionado a dos cuerpos de agua de Puerto Rico, el Río Culebrinas y el Río Guayanilla, utilizando imágenes del sensor IKONOS. El objetivo de este estudio también incluyó aplicar técnicas de análisis y

procesamiento de imágenes para comparar el flujo de TSS en ambientes costeros distintos: una bahía tropical abierta y una bahía tropical cerrada. Finalmente, se pretendió comparar algoritmos que midieran la concentración del TSS desarrollados previamente por otros autores.

METODOLOGÍA

Sensor

Entre los sensores que han sido utilizados para el estudio de sedimentos suspendidos se encuentran el Landsat Multispectral Scanner (Ritchie et al. 1986), MODIS (Miller 2004), e IKONOS (Teodoro et al. 2010). Las características principales de IKONOS, que corresponde a este proyecto, se muestran en la Tabla 1. A pesar del rango espectral restrictivo de IKONOS, su alta resolución espacial lo hace apropiado para el estudio de la calidad del agua (Ekercin 2007). En nuestra investigación, la utilidad de las imágenes de IKONOS fue limitada por la falta de información de la fecha y hora en que fueron adquiridas. Esto no permitió el cálculo del ángulo solar, necesario para determinar valores de irradianza. Por lo tanto, sólo se utilizaron los parámetros de banda necesarios para calcular radianza, que se muestran en la Tabla 2.

IKONOS	
<i>Tipo de sensor</i>	arreglo lineal “pushbroom”
<i>Resolución espacial</i>	82 cm (pancromática) 4 m (multiespectral) 1 m (derivada)
<i>Rango espectral</i>	0.45 – 0.88 μm
<i>Número de bandas</i>	5
<i>Resolución temporal</i>	3 días
<i>Tamaño de la imagen</i>	11 km x 11 km
<i>Resolución radiométrica</i>	8 bits / 11 bits
<i>Programable</i>	Sí

Tabla 1. Características principales de IKONOS, obtenidas de GeoEye Inc., compañía encargada del sensor.

Banda	Ancho de banda	Coefficiente de calibración (CalCoef)
1 (azul)	0.071	72.8
2 (verde)	0.089	72.7
3 (rojo)	0.066	94.9
4 (infrarrojo cercano)	0.13	84.3

Tabla 2. Parámetros de banda de IKONOS, obtenidos de GeoEye Inc., compañía encargada del sensor..

Preprocesamiento

El programa ENVI (versión 4.7) se utilizó para procesar y analizar las imágenes de IKONOS de los ríos bajo estudio. Primero, se aplicaron técnicas de preprocesamiento para transformar las imágenes “crudas” a imágenes listas para el análisis. El primer paso consistió en montar las imágenes, combinando los archivos de las 4 bandas (λ) de IKONOS mediante la herramienta “Layer Stacking”. El área del Río Guayanilla aparecía en dos imágenes que fueron combinadas mediante la herramienta “Mosaicking”. Las imágenes obtenidas luego de ser cortadas con la herramienta “Spatial Subset” para limitarlas a la región de interés se muestran a color verdadero en la Figura 4.



Figura 4. Imágenes a color verdadero producto del montaje y el corte espacial.

A éstas se les realizó una corrección radiométrica utilizando la herramienta “Dark Subtract” para intentar remover el efecto causado por la absorción y dispersión de radiación solar por parte de las partículas en la atmósfera. Finalmente, se llevo a cabo otra corrección radiométrica para convertir los valores digitales a valores de radianza, utilizando la siguiente ecuación en la herramienta “Band Math”:

$$L_{\lambda} = \frac{(10^4)(Valor\ Digital_{\lambda})}{(CalCoef_{\lambda})(Ancho\ de\ banda_{\lambda})} .$$

De haber podido calcular los valores de irradianza, el último paso de preprocesamiento hubiera consistido en calcular la reflectancia a partir de la ecuación:

$$R_{\lambda} = \frac{Radianza}{Irradianza} .$$

Análisis

Luego de obtener las imágenes calibradas con valores de radianza, se realizó una clasificación supervisada *Neural Net* con 500 iteraciones en un intento de adaptar a ENVI la metodología utilizada por Teodoro et al. (2010). Para esto se utilizó la herramienta de definición de regiones de interés del programa (“ROI Tool”), y se crearon rectángulos y líneas para marcar tres clases: océano/mar, sedimentos suspendidos y tierra. Para verificar si se obtendrían resultados más reveladores con otro tipo de clasificación, se llevó a cabo la clasificación no supervisada *K-means*, indicándole a la herramienta que creara 10 clases y realizara 20 iteraciones. En las imágenes obtenidas a partir de *K-means*, se definió aproximadamente el área y la extensión del plumacho utilizando el “Measurement Tool” de ENVI.

Debido a la falta de datos de campo para desarrollar algoritmos propios, se procedió a la aplicación de algoritmos desarrollados previamente para determinar la concentración de sedimentos suspendidos. Estos algoritmos están supuestos a tener valores de reflectancia como

entrada para devolver valores reales de concentración en unidades de mg/l. Como no disponíamos de estos valores, asumimos una relación positiva entre la radianza y la reflectancia, es decir, que a medida que una aumenta (disminuye) la otra aumenta (disminuye), y utilizamos los valores de radianza como entrada para los algoritmos. Es importante recalcar que los valores de concentración obtenidos de esta manera no pueden representar valores reales, pues aún carecen de un factor de conversión que proviene de la irradianza no calculada.

Los siguientes algoritmos fueron adaptados de los desarrollados por Rodríguez-Guzmán et al. (2009) y aplicados utilizando “Band Math”:

$$(1) \text{ TSS} = 602.63 * (0.3043 * (\text{IKONOS banda-rojo}) - 0.0036) + 3.1481$$

$$(2) \text{ TSS} = 602.63 * (0.3043 * (\text{IKONOS banda-rojo}) - 0.0036) + 3.1481$$

$$(3) \text{ TSS} = 602.63 * (0.0007 * \exp(47.755 * \text{IKONOS banda-rojo})) + 3.1481$$

Los siguientes algoritmos fueron adaptados de aquellos desarrollados por Knaeps et al. (2010):

$$(4) \ln(\text{SPM}) = 3.36 * (\text{IKONOS banda-infrarrojo} / \text{IKONOS banda-rojo}) + 1.34$$

$$(5) \ln(\text{SPM}) = 0.70 * (\text{IKONOS banda-verde} / \text{IKONOS banda-infrarrojo}) + 5.5$$

$$(6) \text{ SPM} = \exp(3.36 * (\text{IKONOS banda-infrarrojo} / \text{IKONOS banda-rojo}) + 1.34)$$

Los algoritmos 1 y 4 (a partir de aquí conocidos como *TSS 1* y *ln(SPM)*, respectivamente) fueron reconocidos como los de mejores resultados entre cada grupo de algoritmos, y el resto del análisis se llevo a cabo sólo para ellos. A cada imagen obtenida se le colocó una máscara utilizando regiones de interés y la herramienta “Masking”. Para comparar los algoritmos directamente, se definió una línea como región de interés desde la desembocadura de cada río hacia fuera y aproximadamente paralela a la costa. Los valores extraídos de cada línea fueron graficados utilizando el programa MATLAB.

RESULTADOS

En este escrito nos hemos limitado a presentar las imágenes obtenidas a partir de la clasificación supervisada, la clasificación no supervisada, el algoritmo *TSS 1* y el algoritmo $\ln(SPM)$.

Las Figuras 5-6 muestran los resultados de la clasificación supervisada *Neural Net*. Como para toda clasificación supervisada, los hallazgos están limitados al entrenamiento que fue dado a la herramienta. Debido a que es difícil distinguir a simple vista las concentraciones del TSS en la imagen original, nuestros resultados están limitados a indicarnos solamente la ubicación de los sedimentos. Sin embargo, es importante destacar que las regiones de interés escogidas sirvieron para detectar las áreas con sedimentos de manera más clara que en la imagen original de cada uno de los ríos, tanto en el canal como en la costa. Por ejemplo, identificamos que en la Figura 5, los sedimentos recorren toda la línea de costa, mientras que en la Figura 6, los sedimentos sólo recorren la costa en la zona más cercana a la desembocadura del Río Guayanilla. Finalmente, en estas imágenes es más notable que los sedimentos descargados por el Río Culebrinas se extienden mar afuera mucho más que los sedimentos descargados por el Río Guayanilla.



Figura 5. Producto de la clasificación supervisada *Neural Net* de la imagen del Río Culebrinas (izquierda) a partir de regiones de interés definidas por los autores (derecha).

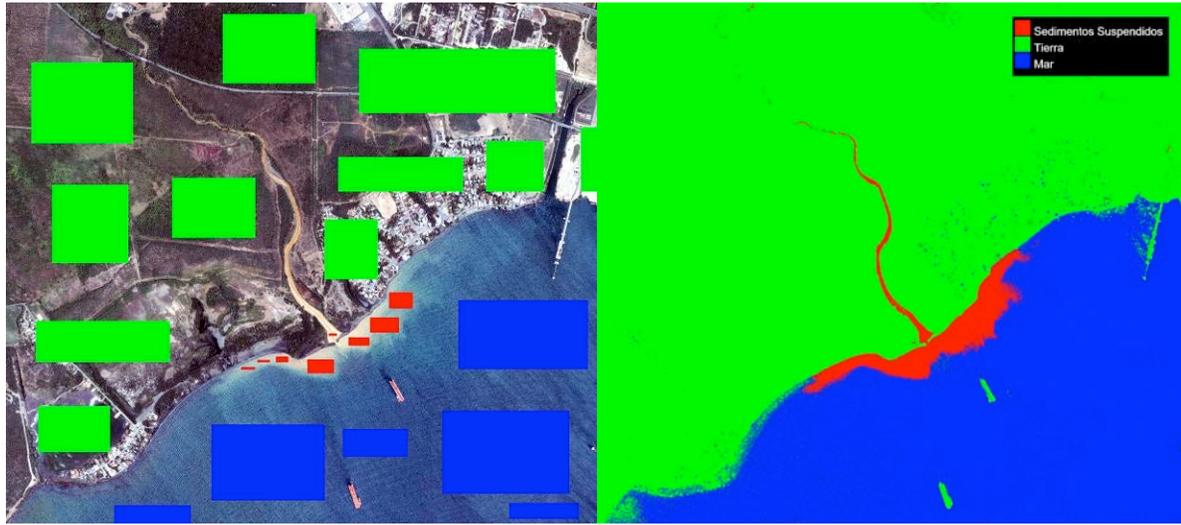


Figura 6. Imagen producto de la clasificación supervisada *Neural Net* de la imagen del Río Guayanilla (izquierda) a partir de regiones de interés definidas por los autores (derecha).

Por otra parte, la Figura 7 muestra los resultados de la clasificación no supervisada *K-means*. Contrario a *Neural Net*, *K-means* logró hacer una distinción entre las concentraciones del TSS, lo que es más notable en la imagen del Río Culebrinas. En la imagen del Río Guayanilla se observa que las Clases 9 y 10 son las que marcan el plumacho, o región de mayor concentración de sedimentos. El resto de las clases se encuentran mezcladas en la Bahía de Guayanilla. Esto puede deberse al patrón de oleaje que se aprecia en la imagen original y que pudiera estar afectando la señal recibida por el sensor IKONOS.

La definición aproximada del plumacho a partir de la Figura 7 resultó en los valores que se muestran en la Tabla 3. Tanto el área como la extensión del plumacho son mayores para el Río Culebrinas que para el Río Guayanilla. Esto se debe al hecho de que la cuenca hidrográfica del Río Culebrinas cubre un área mayor y tiene un promedio anual de precipitación y de escorrentía mayor que la del Río Guayanilla.

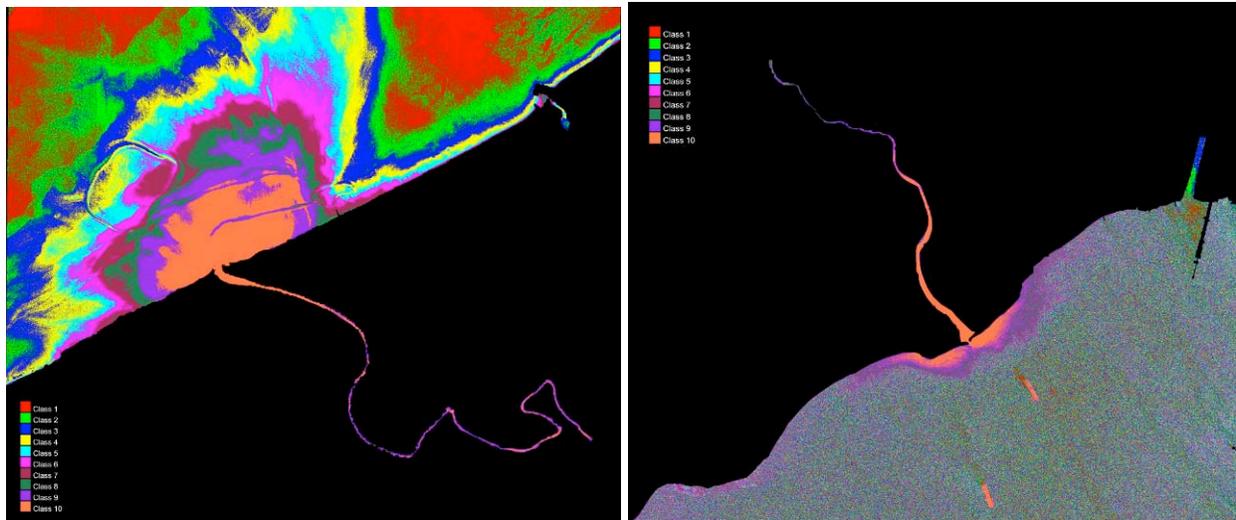


Figura 7. Imágenes producto de la clasificación no supervisada *K-means* de la imagen del Río Culebrinas (izquierda) y del Río Guayanilla (derecha).

Río	Área del plumacho ¹	Extensión del plumacho ²
<i>Culebrinas</i>	375,795 m ²	428.6315 m
<i>Guayanilla</i>	53,784 m ²	66.3702 m

¹Fue definida como el área cubierta por las clases 9 y 10 de la clasificación no supervisada.

²Fue definida por una línea aproximadamente perpendicular a la costa desde la desembocadura del río hasta donde culminaran las clases 9 y 10 de la clasificación no supervisada.

Tabla 3. Medidas aproximadas derivadas de la clasificación no supervisada *K-means*.

Los resultados obtenidos a partir del algoritmo *TSS 1* (Figura 8) concuerdan con la clasificación *K-means*. Debido a que los valores que se integraron al algoritmo fueron de radianza y no reflectancia, los valores de concentración que se presentan aquí no son verdaderos. Aún así, sirven para detectar las regiones de mayor concentración, que se muestran de color rojo y amarillo. Para ambos ríos, se observa que la concentración del TSS va disminuyendo mar afuera, como era de esperarse. Además, se observa que el patrón de corriente de bahía cerrada y el patrón de oleaje más calmado del Mar Caribe mantienen los sedimentos cerca de la costa en el caso del Río Guayanilla, mientras que en el Río Culebrinas, que desemboca en una bahía abierta en el Océano Atlántico, ocurre lo contrario.

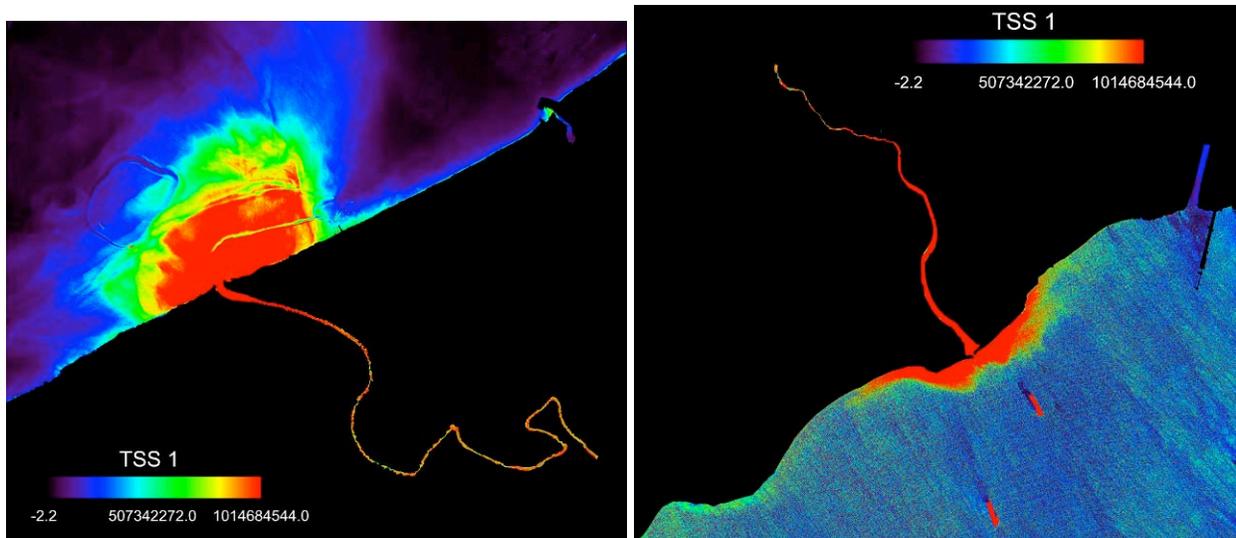


Figura 8. Imágenes producto de la aplicación del algoritmo *TSS 1* a la imagen del Río Culebrinas (izquierda) y del Río Guayanilla (derecha)

La Figura 9 muestra los resultados de la aplicación del algoritmo $\ln(SPM)$. Contrario al primer algoritmo, en estas imágenes se observa un aumento en la concentración del TSS lejos de la desembocadura de los ríos. En el caso del Río Culebrinas, la concentración disminuye para luego aumentar nuevamente mar afuera. En el caso del Río Guayanilla, los valores parecen ser bastante similares entre el canal, la desembocadura y la bahía. La Figura 10 muestra las líneas de extracción de valores utilizadas para realizar las comparaciones directas entre los algoritmos de las Figuras 11-12. Tanto para el Río Culebrinas (Fig. 11) como para el Río Guayanilla (Fig. 12), los algoritmos concuerdan en comportamiento al menos hasta la distancia que habíamos definido como extensión del plumacho (Tabla 3). A partir de ahí, los valores del algoritmo $\ln(SPM)$ aumentan mientras que los de *TSS* disminuyen. Estos resultados pueden ser indicativos de que el algoritmo $\ln(SPM)$ no funciona bien a bajas concentraciones. Sin embargo, las gráficas confirman que nuestra definición del plumacho estuvo relativamente acertada.

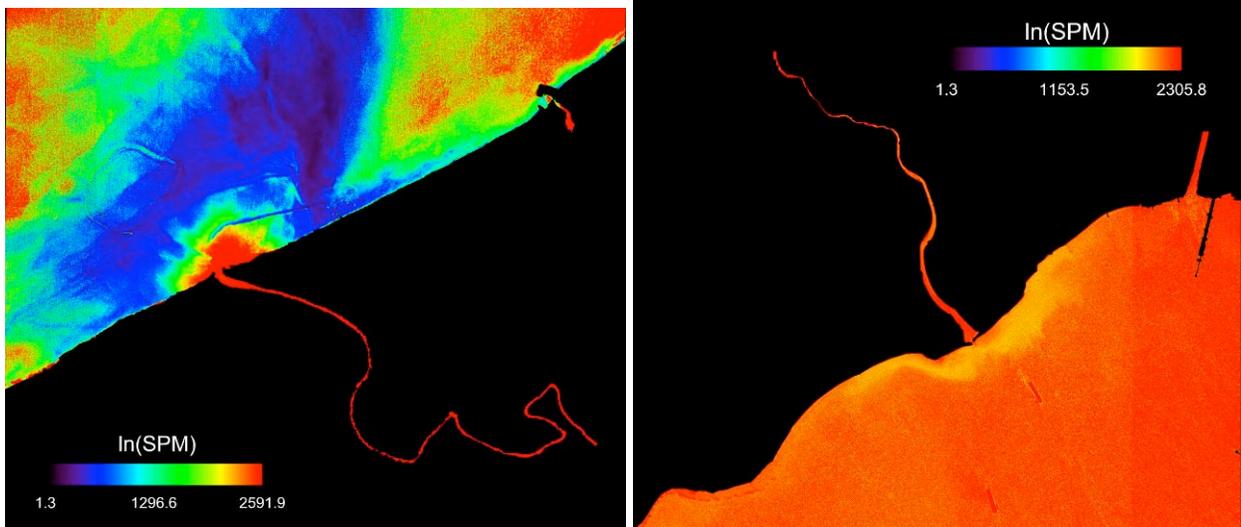


Figura 9. Imágenes producto de la aplicación del algoritmo $\ln(SPM)$ a la imagen del Río Culebrinas (izquierda) y del Río Guayanilla (derecha)



Figura 10. Línea de extracción de valores (en rojo) de la imagen del Río Culebrinas (izquierda) y del Río Guayanilla (derecha)

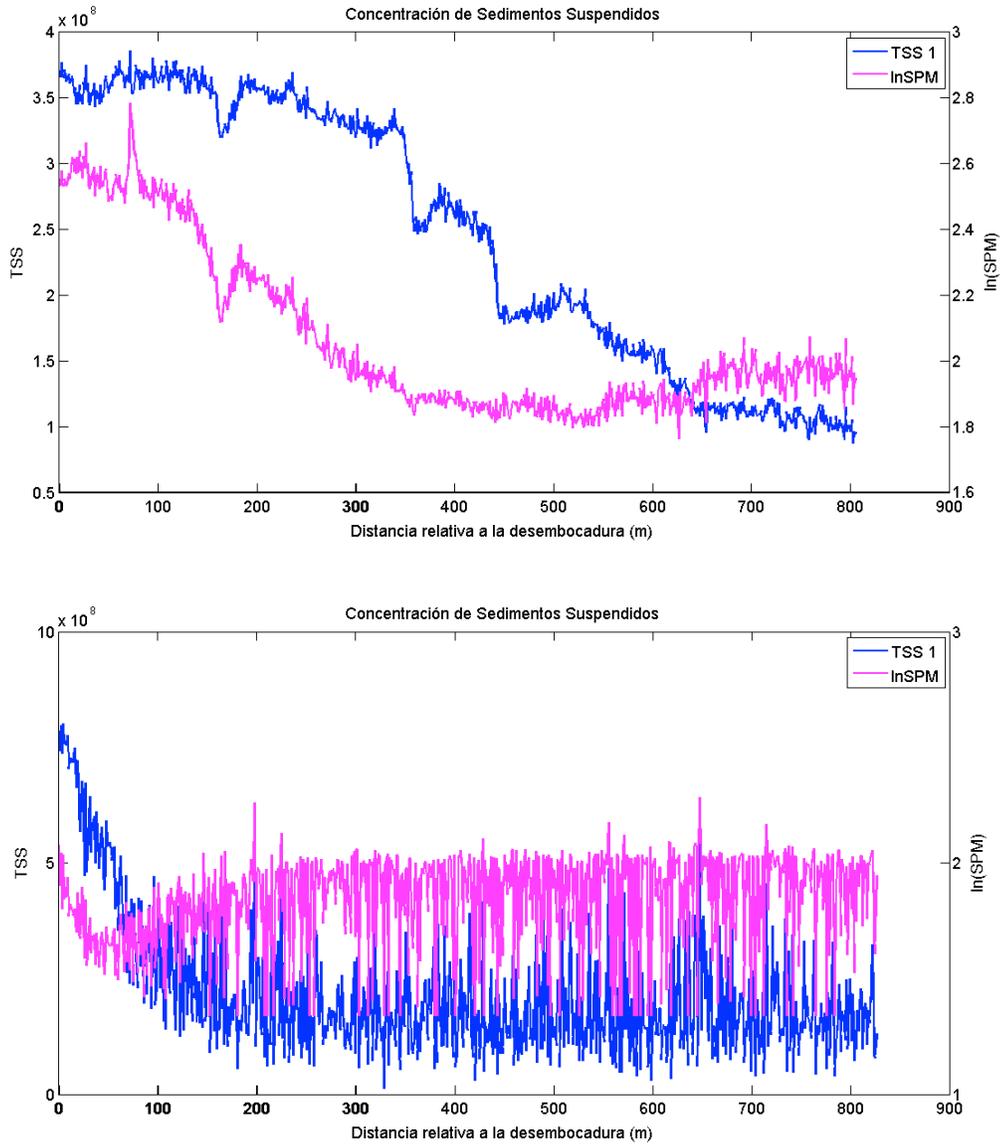


Figura 12. Comparación entre los valores de ambos algoritmos en la línea de extracción de valores para el Río Guayanilla.

CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos en el proceso de clasificación de las imágenes hemos concluido que la clasificación no supervisada fue más eficiente para detectar diferencias en la concentración de sedimentos suspendidos en nuestro estudio que la clasificación supervisada. Esto se debe a la dificultad de visualizar en la imagen original las diferencias en concentración

de sedimentos para darle el entrenamiento adecuado a las herramienta de clasificación supervisada. Los resultados de ambos algoritmos aplicados exhiben un patrón de disminución en la concentración de sedimentos suspendidos desde la desembocadura del río hasta lo marcado como el fin del plumacho. La metodología aplicada confirma que el plumacho del Río Culebrinas abarca una región mayor de lo que abarca el plumacho del Río Guayanilla. Esto puede estar relacionado a que la cuenca hidrográfica del Río Culebrinas es mucho mayor que la del Río Guayanilla y a que éste se encuentra en una región donde hay mayor precipitación.

Finalmente, que los sedimentos suspendidos se mantengan más cercanos a la línea de costa adyacente a la desembocadura del Río Guayanilla se debe probablemente a que en una bahía cerrada las corrientes son menos fuertes y no son capaces de arrastrar los sedimentos mar afuera como en una bahía abierta. Además, los patrones de oleaje más calmados en el Mar Caribe que en el Océano Atlántico contribuyen al estancamiento de los sedimentos en la Bahía Guayanilla.

RECOMENDACIONES

A través de este proyecto, exhortamos a las personas, agencias o compañías interesadas en costear alguna misión basada en la toma de imágenes a través de percepción remota a que se aseguren de recopilar toda la información relacionada a esa toma, como los datos de fecha y hora. Esta información es esencial para poder llevar a cabo investigaciones más certeras y completas, ya sea de sedimentos suspendidos o de cualquier otro tópico que requiera la calibración de las imágenes. Además, es esencial para la obtención de datos de campo que puedan servir para la validación de resultados o para el desarrollo de nuevos algoritmos.

REFERENCIAS

- Campbell, J. B. 2007. *Introduction to Remote Sensing*. New York: The Guilford Press.
- Ekercin, S. 2007. Water Quality Retrievals from High Resolution IKONOS Multispectral Imagery: A Case Study in Istanbul, Turkey. *Water Air Soil Pollut.* 183: 239-251.
- Knaeps, E., Sterckx, S., and D. Raymaekers. 2010. A Seasonally Robust Empirical Algorithm to Retrieve Suspended Sediment Concentrations in the Scheldt River. *Remote Sensing.* 2:2040-2059.
- McGraw-Hill. 2003. *Dictionary of Scientific & Technical Terms*.
- Miller, R. L., and B. A. Mckee. 2004. Using MODIS Terra 250 m Imagery to Map Concentrations of Total Suspended Matter in Coastal Waters. *Remote Sensing of Environment.* 93:259-266.
- Ritchie, J., and F. Schiebe, 1986. Monitoring Suspended Sediments with Remote Sensing Techniques. *Hydrologic Applications of Space Technology.* 233-243.
- Ritchie, J. C., and C. M. Cooper. 2001. Remote Sensing Techniques for Determining Water Quality: Applications to TMDLs. In *TMDL Science Issues Conference, Water Environment Federation, Alexandria, VA*, 367-374
- Rodríguez-Guzmán, V., and F. Gilbes-Santaella. 2009. Using MODIS 250 m Imagery to Estimate Total Suspended Sediment in a Tropical Open Bay. *International Journal of Systems Applications, Engineering & Development.* 3(1):36-44.
- Teodoro, A. C., Gonçalves, H., Pais-Barbosa, J., Veloso-Gomes, F., and F. Taveira-Pinto. 2010. Identification of Beach Features/ Patterns through Artificial Neural Networks Techniques Using IKONOS Data. In *International Society for Photogrammetry and Remote Sensing's Technical Commission VII Symposium.* 574-579