

# **Una metodología para determinar la distribución espacial de sedimentos suspendidos en aguas costeras del Sureste de Sumatra, Indonesia, a partir de imágenes SPOT**

**Stéphane Couturier <sup>1</sup>, David Taylor <sup>2</sup>, Peta Sanderson <sup>3</sup>, Mochammad Ali <sup>4</sup> y Geraldine Lee <sup>5</sup>**

**<sup>1</sup>Laboratorio de SIG y PR, Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, México Circuito Exterior, Ciudad Universitaria, Apto. Postal 20-850, 01000 México D.F. Tel: (52 ) 56 22 43 34; FAX: (52 ) 56 16 05 39 [stephcamelo@lycos.com](mailto:stephcamelo@lycos.com)**

**<sup>2</sup>Department of Geography, Trinity College, University of Dublin, Dublin. Ireland.**

**<sup>3</sup>The University of Notre Dame Australia, 19 Mouat Street, PO Box 1225, Fremantle 6959, Western Australia.**

**<sup>4</sup>Fakultas Pertanian, Universitas Jambi, Kampus UNJA Mendalo, Jambi 36361. Indonesia**

**<sup>5</sup>Centre for Remote Imaging, Sensing and Processing, National University of Singapore, Block S-17, Level 2, Lower Kent Ridge Road. Singapore 119260**

## **1. Introducción**

En las regiones tropicales húmedas se descargan globalmente más del 50 por ciento del agua de ríos, 60 por ciento de partículas suspendidas y 65 por ciento de carbono disuelto desde las masas terrestres hacia el ambiente marino (Meybeck 1988). La mayoría de ese transporte entre tierra y océano ocurre en la región tropical Asia-Pacífico, en donde altas precipitaciones y relieve pronunciado – en conjunto con un cambio veloz de la cobertura vegetal – se combinan para generar caudales masivos de agua y materia (Milliman y Syvitski 1992). Los efluvios enormes de sedimentos, solubles y agua dulce llegan a formar plumas extensivas de materia en suspensión (Nichol 1993, Nittrouer et al. 1995) e impactan significativamente sobre la calidad del agua y las tasas de acreción en áreas costeras (Loneragan y Bunn 1999).

Conectados sólo por estrechos angostos al Mar Meridional de China hacia el norte, al Océano Índico hacia el Sur y al Océano Pacífico hacia el Este, los ambientes marinos en el Mar de Java son relativamente confinados, y son un depósito real de materiales

drenados desde las tierras adyacentes. Las actividades pesqueras y camaroneras son especialmente sensibles a las variaciones estacionales y anuales de insumos relacionados con descargas de ríos, y al impacto cumulativo de los cambios de cobertura vegetal.

Ninguno de los detectores satelitales comercialmente disponibles ha sido diseñado o calibrado específicamente para estudios de zonas costeras a escalas cercanas al 1:50 000. El Coastal Zone Colour Scanner (CZCS) y el Sea-viewing Wide Field-of-View (SeaWiFs) ambos carecen la resolución suficiente mientras las bandas espectrales anchas de detectores ópticos adecuados para la escala espacial, como Landsat TM y SPOT XS, son una limitante, además de que, por ser diseñados para reflectancias de superficies terrestres, su cociente señal sobre ruido es generalmente bajo sobre superficies acuáticas.

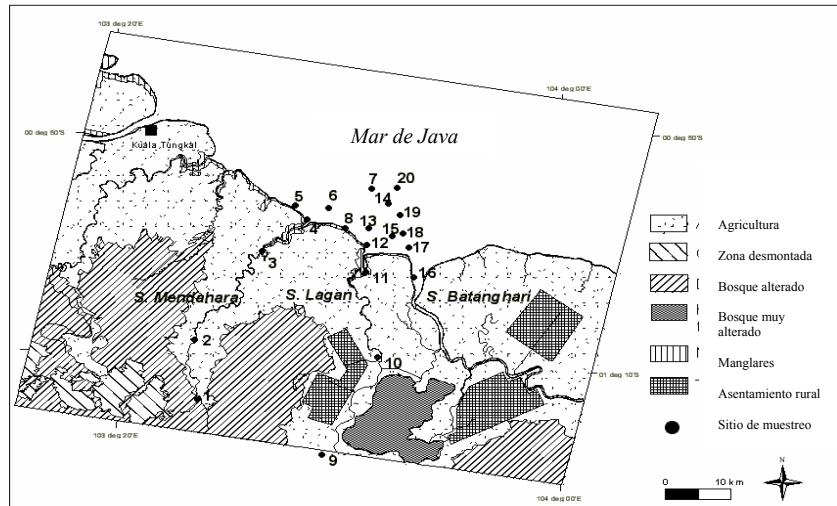
No obstante, se ha reportado la utilización de los últimos en estudios costeros para medir cantidades de Sedimentos Totales Suspendidos (STS) con precisión aceptable; Doxaran et al. (2002, a y b), con buen conocimiento del tipo de sedimentos presenciado, utilizan modelos bio-ópticos analíticos avanzados. Sin embargo, las zonas costeras tropicales a menudo cuentan con poca información sobre las características ópticas de los sedimentos suspendidos y con mayor presencia de materia orgánica disuelta.

## 2. Objetivos

El trabajo presente intenta ilustrar la utilidad de modelos bio-ópticos simples rápidamente aplicables al monitoreo de la calidad del agua en plumas de ríos excepcionalmente marcadas, fenómenos ecológica y económicamente críticos en la cintura tropical.

Con base en datos obtenidos en campo y analizados en el laboratorio, ese trabajo se propone presentar una metodología reproducible para el usuario geógrafo, en cuanto a análisis cualitativa y cuantitativa de imágenes de percepción remota en ambiente costero tropical.

Más específicamente, este trabajo atiende al estudio de caso de la predicción de la distribución de cantidades de Sedimentos Totales Suspendidos (STS) a partir del detector satelital SPOT XS para aguas costeras en el Mar de Java.



*Figura 1: Distribución de los 20 sitios de muestreo en la zona de estudio. Seis conjuntos de datos in situ – incluyendo medidas de reflectancia - y muestreos de agua fueron colectados en estos 20 sitios en 1999.*

### **3. Materiales y Métodos**

Se detalla una metodología incluyendo 4 fases: la descripción del área de estudio, el diseño de muestras de agua y de medidas ópticas en campo, la estandarización y corrección radiométrica de imágenes del detector SPOT XS, y la construcción de un modelo multi-lineal de predicción de STS relacionando la señal de las imágenes con las medidas de campo.

#### **Área de estudio:**

El área de estudio comprende las cuencas de dos ríos (Sungai Lagan y S. Mendahara) y la parte baja de la cuenca, mucho más amplia, de un tercer río (Sungai Batanghari) en el sureste de la isla de Sumatra, en Indonesia, así como las aguas costeras

adyacentes (Figura 1). El Sungai Batanghari fluye hacia el este desde las sierras de Minangkabau del centro de Sumatra, y en su parte baja forma meandros a través de una zona pantanosa extendida a lo largo de la costa. Los ríos Sungai Lagan y S. Mendahara nacen de la misma zona pantanosa, que está compuesta de turba del Holoceno y aluviones, y datada de la pro-gradación episódica cuya última fase principal ocurrió hace aproximadamente 1500 años (Furukawa 1994: 29). La tasa contemporánea de pro-gradación de los pantanos costeros en Sumatra Oriental está estimada entre 30 y 125 m por año (Macnae 1968, Sobur et al. 1977), y hasta más de 200 m por año han sido registrados en ciertas áreas deltáicas (Guelorget et al. 1996). Los pantanos costeros del área de estudio han sido masivamente desmontados desde 1989 (Furukawa 1994: 48) para su conversión a agricultura de plantación.

Los ríos de la zona de estudio desembocan en una bahía, lo que limita el mezclar de las aguas descargadas con el Mar de Java. Debido a fuerzas de Coriolis débiles, las circulaciones principales en el Mar de Java están dirigidas por los vientos de Monzón. El Monzón del Suroeste domina entre aproximadamente mayo y octubre; la dirección predominante de los vientos luego cambia por una dirección opuesta desde finales de octubre hasta abril, durante el Monzón del Noreste. La apertura a los mares adyacentes genera corrientes de marea relativamente fuertes que pueden ocasionar fenómenos intensos de resuspensión vertical (Hatayama et al. 1996).

Velocidades de corrientes hasta los 104cm s-1 fueron registradas durante el pleamar en puntos de los estuarios (Sanderson and Taylor 2003). La precipitación anual promedia es de 2490 mm año-1 (calculada en el periodo 1989-1999 con datos del aeropuerto de Jambi ubicado a 70 km, la estación meteorológica más confiable cercana a la zona de estudio). No hay estación seca pronunciada en la región de estudio, sino que la estación más húmeda está asociada con el Monzón del noreste y la menos húmeda con el Monzón del suroeste.

#### Muestreo de campo y análisis de las muestras de agua:

Se hicieron medidas simultáneas de reflectancia espectral (cociente entre la radiancia reflejada y la radiancia incidente) de la superficie del agua con un espectro-radiómetro de campo GER1500, y medidas de parámetros de la calidad del agua, en 20 sitios de

muestreo (Figura 1) a lo largo de 6 periodos de trabajo de campo distribuidos entre las dos estaciones de Monzón del año 1999. Los 20 sitios de muestreo fueron seleccionados para representar un rango amplio de tipos de agua. Cada periodo de trabajo de campo consistió en 3 días contiguos durante los cuales el muestreo se llevaba a menos de 2 horas del medio día solar. La ubicación de los sitios de muestreo fue localizada a 50-100 m de precisión utilizando un GPS y referencias angulares de objetos terrestres conspicuos con la brújula.

Además, aproximadamente 50 puntos de control fueron colectados con un GPS diferencial para corregir geoméricamente las imágenes SPOT de la zona de estudio hacia productos SPOT XS nivel '2B'.

#### Adquisición y preparación de las imágenes de satélite:

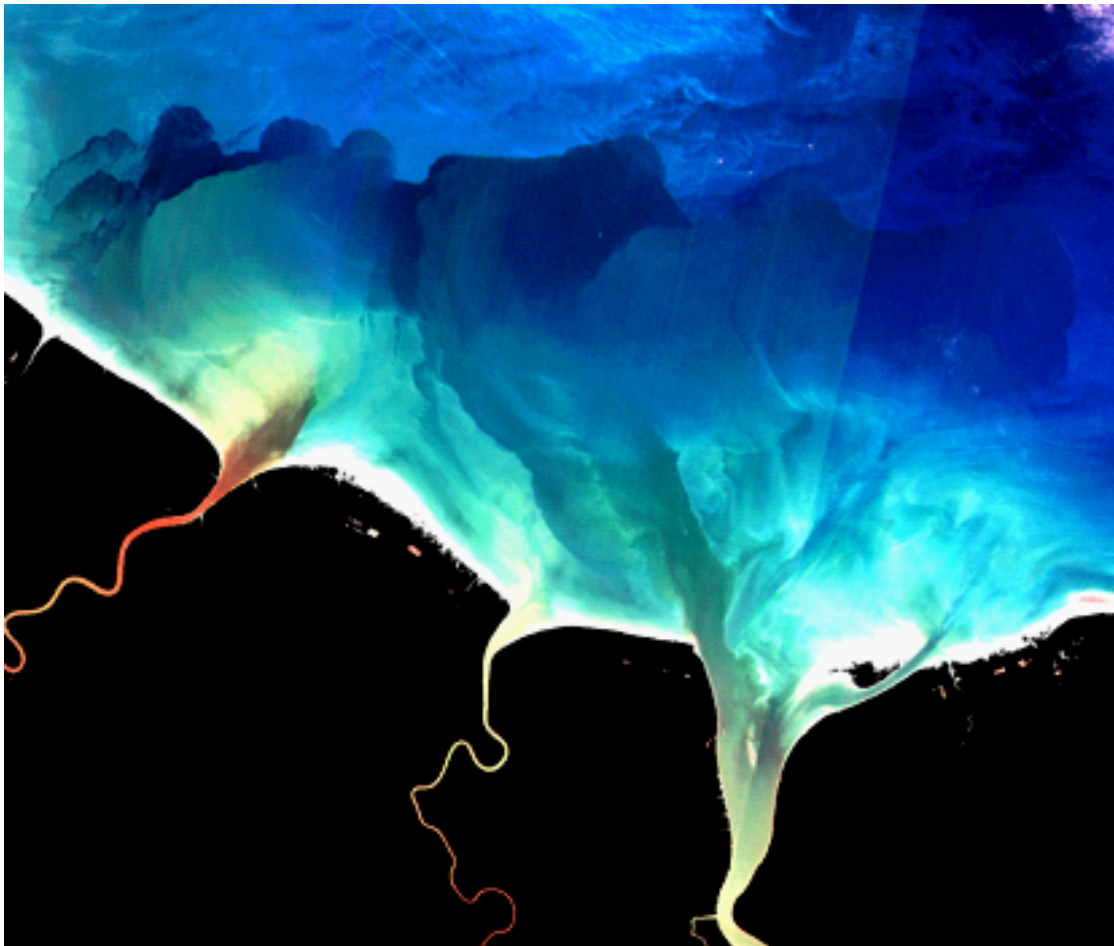
Las imágenes SPOT de 2 sobre-vuelos de la zona de estudio a las 10.30 am, fueron adquiridas en fechas correspondiendo a los dos periodos de Monzón (1ro de febrero de 1999, monzón más húmedo, y 28 de mayo de 1999, monzón menos húmedo). Un ángulo zenital moderado (aproximadamente  $58^{\circ}$ ) y un cielo relativamente despejado (cobertura nublosa inferior a los 10 por ciento) durante la adquisición aseguran condiciones favorables para relacionar la reflectancia a nivel del detector y la calidad del agua (Curran and Novo 1988: 362). Se estandarizaron las imágenes a una iluminación incidente promedio en el año solar y se corrigieron por efectos atmosféricos, utilizando respectivamente el software 5S (Tanré et al. 1990) y el método del píxel oscuro (método descrito en Song et al. (2001) como DOS 1). Para el último método, el valor más oscuro de la reflectancia en cada una de las bandas fue determinado en un área de aguas claras en la región costera, y fue asimilada a la difusión atmosférica en toda la parte costera de la zona de estudio. Más específicamente, se identificó el valor oscuro en una zona de referencia, contigua con la superficie acuática muestreada, ubicada a una distancia a la costa inferior a la del sitio de muestreo más lejano (sitio 20), para que la zona de referencia tuviera condiciones de aerosoles similares a las de la zona de estudio (intermediaria entre los modelos atmosféricos continental y oceánico). El valor oscuro fue restado al valor de reflectancia en todos los píxeles de la zona de estudio, y ese proceso fue repetido para

cada banda de la imagen. A pesar de las limitaciones del método del píxel oscuro (Aås and Sørensen 1995), la técnica es un medio de estandarización de las imágenes en ausencia de información sobre las condiciones atmosféricas.

Además de corregir por las condiciones ambientales, se aplicó una máscara para la parte terrestre de la costa. Las figuras 2a y 2b ilustran los resultados de todo el tratamiento para la preparación de las imágenes satelitales. El umbral de reflectancia utilizado para la máscara en la banda SPOT XS 3 fue de 14 por ciento, con base en un análisis cualitativo de la imagen original.

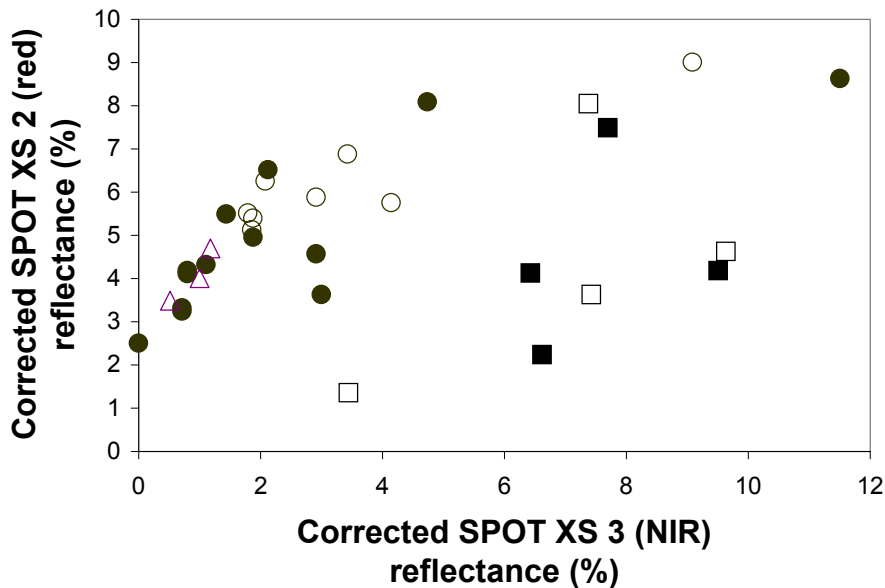


*Figura 2a: Sub-imagen SPOT XS del 1ro de febrero de 1999, con dimensiones 30 x 40 km, después de estandarización de luz incidente, corrección de efectos atmosféricos y puesta de máscara de la parte terrestre*



*Figura 2b: Sub-imagen SPOT XS del 28 de mayo de 1999, con dimensiones 30 x 40 km, después de estandarización de luz incidente, corrección de efectos atmosféricos y puesta de máscara de la parte terrestre*

La figura 3 ilustra que con base en el análisis de la reflectancias corregidas en la bandas 2 y 3 de SPOT XS, se pueden separar en general los sitios de muestreo en 2 grupos de acuerdo con su situación geográfica: agua de río y agua costera.



*Figura 3: Niveles de reflectancia después de las correcciones en las bandas 2 (roja) y 3 (infrarrojo cercano) de las imágenes SPOT XS (símbolos vacíos = 1ro de febrero, símbolos llenos = 28 de mayo) en los sitios de muestreo (■ = sitios costeros, ○ = sitios de aguas claras en el Mar de Java y △ = sitios de río).*

### Fundamentos de la relación entre parámetros de muestreo y datos satelitales

Para establecer relaciones empíricas válidas y correspondencia entre imágenes, los tiempos de colección de datos de campo deben de cumplir con cierta coincidencia con los tiempos de adquisición de datos satelitales, y las interferencias de reflexión especular, de cobertura nublosa y de bruma estratosférica tienen que ser ausentes de la zona estudiada. Solamente uno de los dos sobre-vuelos (el del 28 de mayo) coincidió con un periodo de trabajo de campo (26-28 de mayo de 1999). Otro periodo de trabajo de campo también ocurrió durante la parte temprana de la estación menos húmeda, del 29 de junio al 1ro de julio. En la estación más húmeda, un periodo de trabajo de campo terminó nueve días antes del sobre-vuelo del 1ro de febrero (21 a 23 de enero de 1999). Hay relativamente pocas interferencias ambientales sobre la zona



de estudio en las dos imágenes SPOT, pues alguna reflexión especular y nubes aparecen en la imagen del 28 de mayo pero en otra ubicación. Desgraciadamente una faja de bruma estratosférica cubre parte de la desembocadura de los ríos Sungai Batanghari y S. Lagan en la imagen del 1ro de febrero dejando esa parte sin posibilidad de análisis.

La calidad del agua costera en un tiempo dado dentro de una estación de monzón es principalmente función de: los niveles antecedentes de precipitación (el factor de descarga), el punto temporal en el ciclo de la marea (el factor de re-suspensión), y la tasa de cambio de la cobertura de suelo (el factor cobertura). A pesar de la ausencia de datos a respecto al tiempo característico de respuesta hídrica de cuencas en la zona de estudio, el nivel de alteración de las mismas desde la última década implica que estos tiempos característicos son cortos. Los niveles de precipitación medidos en el aeropuerto de Jambi indican poca variación del factor de descarga entre el periodo de trabajo de campo del 21-23 de enero de 1999 y la fecha de sobre-vuelo SPOT el 1ro de febrero. Durante los siete días anteriores al 1ro de febrero, la precipitación promedio diaria fue de 11.7 mm día<sup>-1</sup>; el promedio para los siete días anteriores al 23 de enero de 1999 fue de 12.1 mm día<sup>-1</sup>. Estas cifras se vuelven 3.2 mm día<sup>-1</sup> y 4.2 mm día<sup>-1</sup> para, respectivamente, los siete días anteriores al sobre-vuelo SPOT del 28 de mayo, y la semana anterior al 1ro de julio 1999. Así, hay poca variación del factor de descarga entre los periodos de trabajo considerados y las fechas cercanas de sobre-vuelo SPOT. Así mismo, el factor de re-suspensión no varía mucho entre el periodo del trabajo de campo en enero y el día del sobre-vuelo nueve días después. Sus puntos en el ciclo de marea corresponden a la fase moderada de la marea viva, con profundidades de agua acerca de 1.0 m arriba de los bancos costeros, ambos momentos ubicados en la parte baja del ciclo semi-diurno fuertemente asimétrico. La adquisición de la imagen del 28 de mayo también coincidió con el ascenso de la marea a la mitad de un ciclo inferior. Un factor interesante para la comparación entre las imágenes es que los niveles de agua a la hora del sobre-vuelo del 28 de mayo fueron más bajos que al tiempo del sobre-vuelo del 1ro de febrero, lo que significa menos profundidades de agua en los bancos lodosos aledaños a la costa y entonces supuestamente un efecto de re-suspensión mayor.

Otro factor significativo fue que sólo los sitios de río fueron muestreados el día del sobre-vuelo del 28 de mayo. Los demás sitios en aguas claras del Mar de Java y en aguas costeras fueron muestreados durante los 2 días anteriores, cuando las condiciones de marea (casi al punto alto de una marea inferior) eran significativamente diferentes y las profundidades de agua eran de 0.3m. El trabajo de campo durante el periodo del 29-06 al 01-07 de 1999 ocurrió al principio de un ciclo principal de marea viva con profundidades de agua más cercanas a las del sobre-vuelo del 28 de mayo. Las aguas claras del Mar y las aguas costeras muestreadas durante el periodo de 29/06 al 01/07 fueron entonces seleccionadas como datos de campo de la imagen del 28 de mayo.

Finalmente a pesar de los cambios extensivos de cobertura vegetal en la región durante la última década del siglo XX, no se registraron cambios significativos en la primera parte de 1999 hasta finales de junio. En consecuencia el factor de cobertura también estuvo considerado como constante durante el periodo de estudio.

#### Relaciones entre la calidad de agua y la reflectancia de la imagen de satélite:

Se exploraron modelos multi-lineares para relacionar la reflectancia en bandas del detector SPOT XS y niveles de concentración de STS medidos en el campo.

Una regresión multi-linear fue primero desarrollada entre las mediciones de STS del 21 a 23 de enero de 1999 y las reflectancias de la imagen del 1ro de febrero, porque los valores de STS estaban mas uniformemente distribuidos entre el mínimo y el máximo en este periodo más húmedo enero-febrero, que en el periodo más seco de mayo-julio. Los resultados de la regresión fueron utilizados para construir un modelo de predicción de STS para la imagen SPOT del 28 de mayo y el modelo fue validado por las mediciones de campo de STS del 29-06 al 01-07.

Los valores de reflectancia fueron determinados para cada banda promediando la señal de un conjunto de píxeles alrededor de la ubicación GPS del sitio de muestreo.

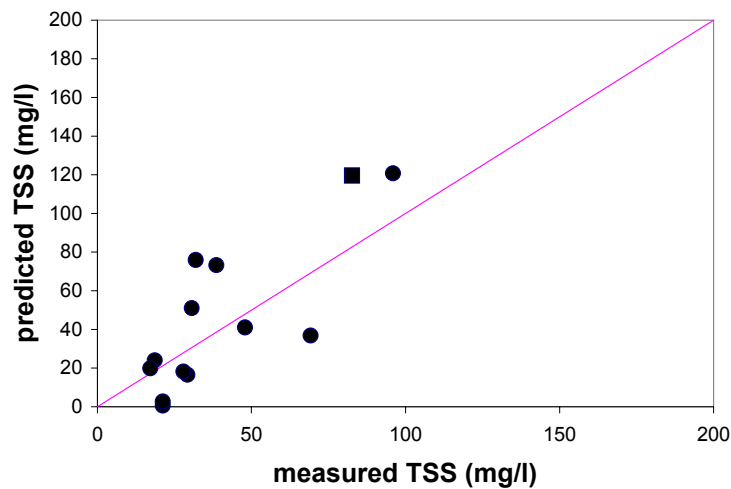
#### 4. Resultados

La siguiente formula fue derivada del modelo multi-linear construido a partir de una regresión significativa ( $r^2 = 0.94$ ,  $p < 0.01$ ) de los datos de enero-febrero, utilizando las bandas 2 y 3 de SPOT XS:

$$\text{TSS (mgL}^{-1}\text{)} = -31.184 + (20.832 \times \text{XS 2 reflectancia}\%) + (7.196 \times \text{XS 3 reflectancia}\%)$$

# = valores por ciento

La misma relación fue utilizada para predecir valores de STS en la imagen del 28 de mayo. Los valores de STS fueron calculados en conjuntos de píxeles correspondiendo a 12 sitios de agua costera y se compararon con el valor de STS medido durante el periodo de muestreo de 29-06 a 01-07. Se encontró una correlación muy significativa ( $r^2 = 0.65$ ,  $p < 0.01$ ) (figura 4) que demuestra la capacidad de predicción del modelo.



**Figure 4:** Resultados de la predicción de niveles de STS por el modelo multi-linear en la imagen del 28 de mayo de 1999, comparados con los niveles medidos en campo (29/06-01/07/99) para sitios de agua costera. La predicción tuvo la precisión siguiente: error cuadrático promedio de  $24 \text{ mgL}^{-1}$  para un rango de concentraciones de 17 a  $96 \text{ mgL}^{-1}$  ( $r^2 = 0.65$ ,  $p < 0.01$ ). Símbolos explicados en la Figura 3.

## 5. Conclusiones

Con base a datos colectados en la parte sur-oriente de Sumatra y en el Mar de Java durante 6 periodos de trabajo de campo, a lo largo de un ciclo completo de monzón en 1999, se pudo establecer una relación empírica entre la concentración de STS y la reflectancia corregida del detector remoto SPOT XS. Relación que fue validada de una imagen a otra de diferente fecha. Esta metodología puede ser replicada en cualquier otro sitio costero con pocos insumos de información sobre tipos de sedimentos suspendidos, y extendida para la determinación de materia orgánica disuelta, con modificación adecuada de la estructura de la relación concentración-reflectancia por lo que la materia orgánica disuelta absorbe la luz incidente. Posibles mejoramientos de la metodología incluyen el desarrollo de un método de corrección atmosférica basado en la medida de reflectancia de un punto de referencia oscuro en la zona de estudio.

Un trabajo adicional es requerido para asentar todos los resultados de este método en forma de mapas de STS superficiales en aguas costeras de la zona de estudio, permitiendo un análisis hidro-geográfico detallado, e identificar las variaciones estacionales de monzón, tomando en cuenta la información disponible sobre las condiciones de marea.

La metodología tiene el potencial de analizar ciclos de descarga de sedimentos en el futuro a partir de imágenes de satélite, y de ahí contribuir a evaluar el impacto ecológico y económico de fenómenos como la modificación de la cobertura vegetal o las oscilaciones estacionales pronunciadas (e.g. inducidos por El niño-La niña).

## Reconocimientos

Esta ponencia está dedicada a la memoria de Mochammad Ali, coautor de este trabajo, quién falleció en un accidente en la isla de Java en Agosto de 2002.

A su dedicación para la investigación, a su persona generosa, y al valor inestimable de su trabajo académico de hormiga, hacia conocimientos claves para entender los mecanismos de degradación ecológica y social de las regiones costeras tropicales donde habita su familia y su pueblo.

## REFERENCIAS

- Aås, E and K. Sørensen, Field observations of the relation between satellite and sea radiances in coastal waters, *Applied Optics*, 34, 5422-5432, 1995.
- Curran, P.J. and E.M.M. Novo, The relationship between suspended sediment concentration and remotely sensed spectral radiance: a review, *Journal of Coastal Research*, 4, 351-368, 1988.
- Doxaran, D., Froidefond, J-M. and Castaing, P., 2002a, A reflectance band ration used to estimate suspended matter concentrations in sediment-dominated coastal waters. *International Journal of Remote Sensing*, 23, 5079-5085.
- Doxaran, D., Froidefond, J-M., Lavender, S. and Castaing, P., 2002b, Spectral signature of highly turbid waters Application with SPOT data to quantify suspended particulate matter concentrations. *Remote Sensing of Environment*, 81, 149-161.
- Furukawa, H, *Coastal Wetlands of Indonesia: Environment, Subsistence and Exploitation*, Kyoto University Press, Japan, 1994.
- Guelorget, O., J.L. Martin, A. Lefebvre, C. Courties, J.P. Perthuisot, A. Supangat, J. Fuchs and M. Suastika, Open sea paralic ecosystems south of Java Sea: environmental approach by flow cytometry, *Journal of Coastal Research*, 12, 256-270, 1996.
- Hatayama, T., T. Awaji, and K. Akitomo, Tidal currents in the Indonesian seas and their effect on transport and mixing, *Journal of Geophysical Research*, 101 C5, 12,353-12,373, 1996.
- Loneragan, N.R. and S.E. Bunn, River flows and estuarine ecosystems: Implications for coastal fisheries from a review and a case study of the Logan River, southeast Queensland, *Australian Journal of Ecology*, 24, 431-440, 1999.
- Macnae, W., A general account of the flora and fauna of mangrove swamps and forests in the Indo-West-Pacific region. *Advances in Marine Biology*, 6, 73-270, 1968.
- Meybeck, M., How to establish and use world budgets of riverine materials, in *Physical and Chemical Weathering in Geochemical Cycles*, edited by A. Lerman and M. Meybeck, pp 247-272, Kluwer Academic, The Hague, 1988.

- Milliman, J.D. and J.P.M. Syvitski, Geomorphic/tectonic control of sediment discharge to the ocean: The importance of small mountainous rivers, *Journal of Geology*, 100, 525-544, 1992.
- Nichol, J.E., Remote sensing of water quality in the Singapore-Johor-Riau growth triangle, *Remote Sensing of the Environment*, 43, 139-148, 1993.
- Nittrouer, C.A., G.J. Brunskill and A.G. Figueiredo, Importance of tropical coastal environments, *Geo-Marine Letters*, 15, 121-126, 1995
- Sanderson, P.G. and Taylor, D.M., 2003, Short-term water quality variability in two tropical estuaries, central Sumatra, *Estuaries*, 26, 156-165.
- Sobur, A.S., M.J. Chambers, R. Chambers, S.H. Damapoli and A.J. Hanson, *Remote sensing applications in the Southeast Sumatera coastal environment*, IPB, Bogor, 1977.
- Song, C., Woodcock, C.E., Seto, K.C., Pax Lenney, M. y Macomber, S.A., 2001, Classification and change detection using Landsat TM data: When and how to correct atmospheric effects?, *Remote Sensing of the Environment*, 75, 230-244.
- Tanré, D., C. Deroo, P. Duhaut, M. Herman, J.J. Morcrette, J. Perbos and P.Y. Deschamps, Description of a computer code to simulate the satellite signal in the solar spectrum – the 5S code, *International Journal of Remote Sensing*, 11, 659-668, 1990.