

# Aplicación de teledetección y SIG para el levantamiento cartográfico de los suelos de la cuenca Solani, India

*Application of remote sensing and GIS for soil mapping in the Solani basin, India*

Guillén Carlos<sup>1</sup>, Murugan Vel<sup>2</sup> y Dávila Mirian<sup>3</sup>

*Recibido: mayo, 2014 / Aceptado: noviembre, 2014*

## Resumen

La planificación del suelo necesita ser orientada con base en la cartografía del área de interés. Se realizó el análisis fisiográfico para la delineación de las unidades cartográficas de suelo (UCS) de la cuenca Solani, región Uttarakhand-India, a través de la teledetección y los sistemas de información geográfico (SIG). Se aplicó la Clasificación Supervisada, NDVI, PCA, Realce de Contraste y *Soil Brightness Index* sobre imágenes LANDSAT TM, IRS-P6 LISS-III. Se obtuvieron las características pedológicas a través de un chequeo de campo de las UC ya delineadas y ajustadas con la observación de campo. En función a la fisiografía, vegetación e información edafológica, se identificaron las regiones de montañas de Siwalik, colinas residuales, piedemonte y planicies aluviales, así como 21 UC. Los suelos fueron clasificados como Entisoles e Inseptisoles, principalmente los Typic Haplusteps. La teledetección y los SIG permitieron sistematizar con mayor eficiencia la caracterización de los suelos de la cuenca.

**Palabras clave:** Cartografía de suelos; teledetección; SIG; cuenca Solani; India.

## Abstract

The soil planning needs to be oriented based on the soil mapping of interest area. For the delineation of soil mapping units (SMU) we carried out a Physiographic Analysis of the basin Solani in the region of Uttarakhand-India by means of the Remote Sensing and Geographic Information Systems (GIS). For the analysis, the Landsat TM and IRS-P6 LISS-III images, the supervised classification, NDVI, PCA, contrast enhancement and Soil Brightness Index were applied. The Pedological features were obtained by means of field checking of the mapping units already delineated and fixed with the field observation work. Based on the physiography, vegetation and soil information 21 SMU on the mountain regions of Siwalik, residual hills, foothills and floodplains were identified. They were classified as Entisols and Inseptisoles, mainly including Typic Haplusteps. The remote sensing and the GIS allowed the systematization and characterization of soils in the basin more efficiently.

**Key words:** Soil mapping; remote sensing; GIS; Solani basin; India.

1 Instituto Nacional de Salud Agrícola Integral (INSAI), Sociobioregion Andina, Mérida-Venezuela. Correo electrónico: guillencarlos4@gmail.com

2 Indian Council of Agricultural Research, Port Blair Island-India.

3 Universidad de los Andes, Escuela de Geografía, Mérida-Venezuela.

## 1. Introducción

La explotación descontrolada de los suelos puede conducir a resultados desastrosos que generarían efectos adversos sobre todo en la sostenibilidad de las comunidades. Por lo tanto, la planificación del desarrollo necesita por sí misma ser orientada con base en las condiciones del recurso suelo, así como en las prácticas actuales y conservacionistas de utilización del mismo. Esta planificación se logra a través de una cartografía o inventario del área que se tenga previsto trabajar. La cartografía del suelo es el precursor para el reconocimiento de la extensión, génesis, potencialidad y limitación, de manera de predecir su comportamiento para un propósito específico y clasificarlo de acuerdo a su evaluación sistemática.

La caracterización de los suelos (en terreno) por medio de calicatas y/o barrenos integra los conocimientos de los procesos y factores de la pedogénesis, entre ellos, los análisis de los patrones de uso de la tierra (vegetación), relieve, clima, tiempo de evolución de los suelos y su material parental; caracterización que permite su clasificación taxonómica y de acuerdo a su variabilidad o distribución espacial, son agrupadas en unidades cartográficas homogéneas.

La información proveniente de sensores remotos satelitales ha emergido como una herramienta vital en los reconocimientos del recurso suelo a escalas que van desde lo local hasta lo regional, ayudando a desarrollar el óptimo plan de uso de la tierra para un desarrollo sustentable. La tarea del incremento de la información

sobre los suelos ha sido grandemente sinergizada por el aumento de la velocidad y fiabilidad con la cual la información espacial y temporal es generada por las técnicas de sensores remotos, con un costo efectivamente manejable. Una de las más efectivas aplicaciones de la teledetección es la ubicación y clasificación del uso de la tierra, siguiendo métodos visuales y digitales de interpretación. Algunas de las técnicas que se aplican para identificar los tipos de uso de la tierra son las clasificaciones supervisadas y los realces digitales de datos multiespectrales.

Los elementos de superficie que son reflejados en las imágenes de satélites proveen suficiente información para delinear con precisión los bordes de las unidades de suelos, por medio de una sistemática interpretación. Los factores que afectan la reflectancia del suelo son complejos, variables y tienen frecuentemente una acción combinada. Un ejemplo de ello lo conforma la rugosidad superficial, el contenido de carbono orgánico, los agregados superficiales del suelo, el contenido en hierro, el contenido de agua, los contenidos de carbonatos y las texturas superficiales (Jester & Klik, 2005; Vasques *et al.*, 2008; Stevens *et al.*, 2010; Eshel *et al.*, 2004; Sellitto *et al.*, 2009; Mouazen *et al.*, 2006; Viscarra *et al.*, 2006; Meléndez *et al.*, 2008; Lagacherie *et al.*, 2008; Santra *et al.*, 2009). Estas propiedades son diferenciadas por las observaciones multiespectrales y ayudan a la correcta planificación de los sitios de observación o puntos de muestreo, de manera de validar los bordes de las unidades fisiográficas.

La fisiografía comprende el estudio de la superficie en su conjunto, forma, geología, clima, suelo, agua, vegetación y sus inter-relaciones. La importancia de las propiedades fisiográficas a escoger para los reconocimientos de suelo, variarán dependiendo del tipo de área bajo investigación y el uso para el cual se disponen los resultados. De tal manera, la comprensión de la estrecha relación que existe entre la fisiografía y las propiedades del suelo permite, basado en un mapa fisiográfico, inventariar y mapear el recurso suelo en grandes superficies (Hilwig & Karale, 1973).

El propósito del estudio es demostrar que la utilización de tecnologías de sistemas de información geográficos (SIG) y de teledetección (procesamiento digital de imágenes satelitales), pueden ayudar a perfeccionar el análisis fisiográfico, la caracterización cartografía de los suelos, optimizando los recursos para la obtención de la información en amplias superficies, como la cuenca Solani, al noreste de India.

## 2. Materiales y métodos

El presente estudio consiste en la aplicación de los sistemas de información geográficos y la teledetección en el estudio de suelos. Su objetivo es la interpretación, identificación, cartografía de las características de los suelos e integración de todos estos atributos para identificar los suelos de la cuenca Solani. Para lograr este objetivo, se aplicó las técnicas de interpretación de imagen de satélite con los chequeos sobre el terreno para la

preparación de los mapas fisiográficos y geomorfológicos de la cuenca Solani.

### 2.1 Descripción de la zona de estudio

El área de estudio cubre una superficie de 49.911 ha y está situada sobre la parte alta y media de la región orográfica de Siwalik. El río Solani que da origen a la cuenca, es uno de los principales tributario del río Ganges. El área de estudio está localizada entre las coordenadas 29°30' a 30°15' Norte y 77°43' a 78°00' Este. La cuenca fue delineada con las cartas topográficas número 53 F/16 y G/13 de escala 1:50.000. La misma está bajo la división política territorial del distrito Saharanpur del estado Uttar Pradesh y del distrito Haridwar del estado Uttrakhand, República de la India (Figura 1).

El área de estudio presenta un clima sub-tropical semiárido. Es influenciado por el monzón húmedo tropical entre los meses de julio-septiembre y diciembre-enero de cada año. La precipitación promedio es de 1.004 mm y la temperatura media anual es de 24,3 °C. La altitud varía desde 300 hasta 940 msnm. La fisiografía de la cuenca Solani esta segmentada en cinco grandes regiones: montañas de Siwalik, montañas residuales, piedemonte, planicies aluviales y vegas. Las llanuras aluviales son por lo general ligeramente inclinadas. El relieve evidencia las huellas dejadas por las fuerzas geológicas como las tectónicas y la erosión. La geología del área es compleja, pero con estructuras discernibles; su litología presenta viejas gravas y depósitos aluviales como las areniscas, filitas, esquistos arcillosos, lutitas y conglome-

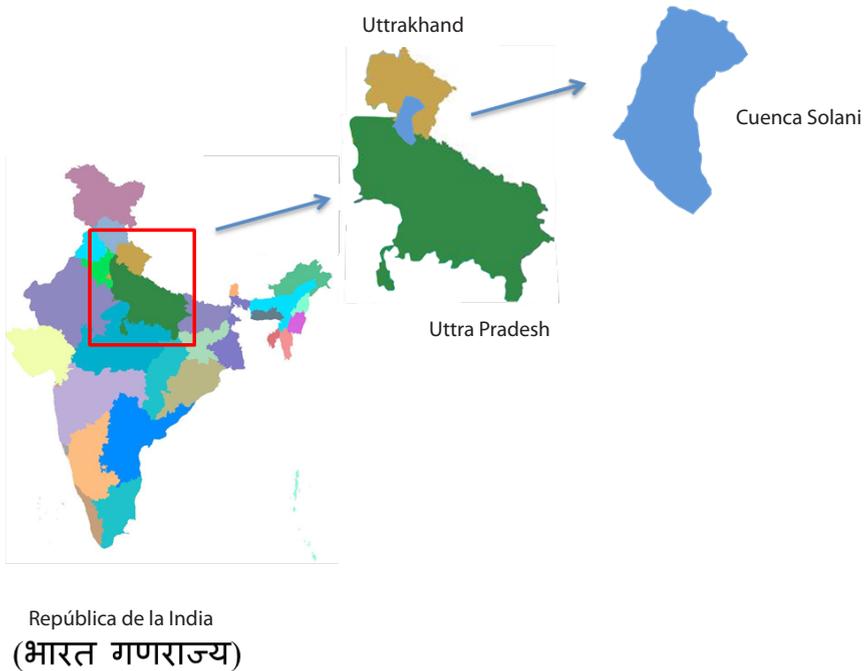


Figura. 1 Localización del área de estudio

rados. Las características de las rocas superiores de Siwalik son conglomerados, cantos rodados y bloques de cantos rodados con matriz arenosa. El piedemonte y la llanura aluvial se han formado a partir del depósito constante de materiales que son transportados por numerosos ríos y riachuelos, manteniendo las llanuras de inundación como llanuras jóvenes. En la zona de piedemonte, el material depositado es más grueso que el de la llanura aluvial, incluyendo gravas redondeadas y areniscas.

Sobre la base de las regiones fisiográficas, la cobertura vegetal varía de un bosque denso en las montañas de Siwalik a un bosque degradado en las monta-

ñas residuales, pasando por los sistemas agrícolas del piedemonte y la llanura aluvial (caña de azúcar, trigo, arroz, maíz y mostaza). Las vegas están cubiertas por herbazales que son utilizados en diferentes períodos para pastoreo.

## 2.2 Imágenes satélites e información digital utilizada

Se empleó las imágenes del satélite Indio IRS-P6 LISS - III de 7 bit Resolución Radiométrica (R. R) de los meses de abril y octubre 2005, y las imágenes del satélite LANDSAT TM de 11 bit de R. R del mes de noviembre del año 2000; a su vez se utilizó el SRTM de 90 m. La base cartográfica empleada fueron las cartas

topográficas 53 F/16 y 53 G/13 del Servicio de Reconocimiento de India (SOI), de proyección UTM, zona 43 y Datum WGS84 (información concedida por *Indian Institute of Remote Sensing-IIRS 2007*).

### 2.3 Procesamiento digital de las imágenes de satélites

El procesamiento digital de imágenes (PDI) consiste en una serie de métodos y procesos para manipular e interpretar las imágenes digitales con la ayuda de equipos computacionales (Lillesand *et al.*, 2007). Una imagen digital está conformada por números digitales llamados píxeles, que representan la cantidad física de la radiación almacenada en una memoria digital, y procesada por la computadora. El procesamiento inicial de los datos crudos se emplea para corregir las distorsiones radiométricas y geométricas de la imagen y eliminar el ruido. Las distorsiones radiométricas obedecen a mecanismos que alteran los valores de brillo de los píxeles y se deben fundamentalmente a interferencias atmosféricas y a efectos asociados a la instrumentación (Lillesand *et al.*, 2007). Las técnicas de PDI utilizadas en el levantamiento fisiográfico y la cartografía de las unidades de suelo fueron los siguientes:

#### 2.3.1 Realce de contraste de la imagen (Contrast enhancement)

Es el procesamiento que tienden a mejorar la interpretabilidad visual de una imagen. En nuestro trabajo se empleó la técnica de contraste lineal, la cual consiste en expandir el rango de valores inicia-

les de los píxeles hasta obtener el rango máximo de 0 a 255. Al expandirlos, se logra realzar detalles sutiles de la imagen, difíciles de discriminar con la compresión inicial de la imagen (Lillesand *et al.*, 2007).

#### 2.3.2 Análisis de Componentes Principales (PCA)

Es matemáticamente definido como una transformación lineal ortogonal de la data a un nuevo sistema de coordenadas en donde la mayor varianza se acumula en un eje o proyección denominada 'primer componente principal'; la segunda varianza más grande queda representada en el segundo eje o proyección, y así sucesivamente. El PCA es teóricamente la transformación más óptima en términos de mínimos cuadrados, reduciendo la dimensionalidad de la información, reteniendo las características que mayor contribuyen a la varianza.

#### 2.3.3 Relación de bandas (Band ratio)

Para mejorar o extraer características a partir de imágenes de satélite, que no puedan ser detectadas claramente en una banda única, se puede utilizar la información espectral del objeto captado en múltiples bandas. Una imagen de la escena relacionada compensa eficazmente la variación de brillo causada por las diferencias en la topografía y realza el contenido de color de los datos. El índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) es una transformación o relacionamiento no lineal de la banda roja (R) del visible y la banda del infra-rojo cercano (NIR). El NDVI también es una medida alternativa

que permite conocer la cantidad y condición de la vegetación. Este índice está asociado con las características del dosel de la vegetación, índice del área foliar y el porcentaje de cobertura de la vegetación.

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$$

#### 2.3.4 Transformación de la imagen

En éste proceso, la imagen es transformada en un mapa de tipo raster, utilizando varios coeficientes. Los coeficientes usados para la imagen IRS P6, LISS III en el cálculo del Índice de Brillantez del Suelo (SBI *Soil Brightness Index*) son los siguientes:

$$(SBI) = 0,4233B1 + 0,4328B2 + 0,6490B3 + 0,4607B4$$

La clasificación supervisada también es usada para identificar y supervisar la gran variabilidad de coberturas y usos de los suelos, incluyendo el industrial, residencial y comercial (Xianbin *et al.*, 2007). Existen diferentes sistemas de clasificación para los diferentes tipos de utilización de la tierra. El presente trabajo se basó en la información recolectada a partir de las imágenes de satélite para establecer un esquema de clasificación jerárquico de los usos de los suelos de la cuenca Solani, con el fin de comprender la calidad y distribución de los mismos.

La clasificación supervisada de las imágenes consistió en la identificación de los diferentes patrones que posee la imagen, de manera de dividir la imagen en algunas subregiones acorde a sus diferentes propiedades. Cada segmento o subregión son identificadas de acuerdo a su tono, color, textura, continuidad en di-

ferentes áreas de interés (AOI), asignándoles un posible uso o cobertura de suelo que será verificada en campo. El algoritmo utilizado para clasificar la imagen fue el de Mínima distancia.

#### 2.4 Cartografía de los suelos

La cartografía de los suelos consistió en la selección y adquisición de la información, interpretación preliminar (pre-campo), verificación en campo de las unidades pre-definidas e interpretación y ajuste de las unidades de suelo.

##### 2.4.1 Interpretación preliminar

Los insumos empleados en el área de estudio para la definición de las unidades de suelo fueron: la imagen IRS P6 LISS III geo-codificada estándar en composición falso color (combinación R, G, B-2, 3, 4), impreso a escala 1:50.000, las imágenes producto del índice de brillantez del suelo (*Soil Brightness Index*), índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) y la clasificación supervisada. La identificación y delineación de las unidades cartográficas se basó en la interpretación de la variación fisiográfica. Cada geoforma o unidad fue subdividida en áreas de mayor homogeneidad en cuanto a la combinación de color, tono, textura, patrón, pendiente y usos de la tierra identificados en las imágenes. Las combinaciones se estructuraron en una clave interpretativa jerarquizada.

##### 2.4.2 Verificación de campo

El trabajo de campo consistió en coleccionar la información de terreno de la cuenca Solani para ajustar la previa interpreta-

ción de las áreas y bordes de las unidades cartográficas, así como identificar la cobertura vegetal y usos de la tierra, precisando sus relaciones con las propiedades de los suelos. La ruta de muestreo fue seleccionada en función de cubrir la mayor y más representativa superficie de las diferentes unidades geomorfológicas y tipos de cobertura vegetal presentes en la cuenca.

Se realizaron 9 puntos de muestreo en dos transectas (TS1 y TS2), orientados hacia las tres principales regiones fisiográficas: montañas de Siwalik, piedemonte y planicies aluviales, ya que representan aproximadamente el 88% del total de la superficie y las dos líneas de máxima variabilidad de la cuenca Solani. A su vez, se tomaron 27 puntos de chequeo en unidades cartográficas similares, con el fin de correlacionar los resultados de los muestreos de suelo y asociarlos con las características y/o segmentos de la imagen. Tanto los puntos de muestreo como los de chequeo estuvieron asignados en función de las principales regiones fisiográficas, la variabilidad espacial de los suelos encontrada y los diferentes usos de la tierra interpretados en las imágenes de satélite (cultivos agrícolas, plantaciones forestales y bosques naturales).

El trabajo en cada punto de muestreo se basó en la perforación y descripción de calicatas de acuerdo al Manual de Reconocimiento del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos *Soil Survey Manual (Soil Survey Division Staff, 1993)*. Se caracterizó el entorno identificando el tipo de formación vegetal de cobertura dominante, el tipo de uso de

la tierra y pendiente del terreno. Se preparó la calicata para su descripción, se identificaron los horizontes del perfil del suelo y se describieron las propiedades: color, agregación, presencia de raíces, porosidad, reacción del suelo al HCl, estructura, consistencia. Determinación de pendientes.

Para los puntos de chequeo se verificó, a través de un barreno, que las unidades cartográficas no descritas por calicatas presentarán las mismas características y propiedades de los suelos encontradas en las demás unidades. Las muestras fueron preparadas y analizadas en el laboratorio de suelos del Instituto Indio de Sensores Remotos (IIRS). Los análisis realizados sobre las muestras fueron: contenido de materia orgánica, carbonatos, hierro cristalino, granulometría, capacidad de intercambio catiónico (CIC), cationes intercambiables, aluminio intercambiable, pH en agua, nitrógeno total, amonio y nitrato.

#### 2.4.3 Interpretación post campo

La interpretación post campo consistió en reinterpretar y/o modificar las unidades previamente delimitadas; ajustando los bordes a partir de los datos recolectados en campo, los resultados del análisis de las muestras de suelos en laboratorio y la imagen satelital. La clasificación taxonómica fue realizada a nivel de familia, a partir de la décima edición de la Clave para la Taxonomía de Suelos de la USDA del año 2006; nivel de clasificación (detalle) que permite proveer la información edafológica necesaria para la planificación del desarrollo agropecuario de la cuenca Solani.

### 3. Resultados y discusión

#### 3.1 Procesamiento digital de imágenes

El procesamiento digital de las imágenes nos permitió extraer la data captada por los sensores remotos satelitales, la cual fue usada para interpretar la información del área de estudio y la delimitación de unidades fisiográficas. Los resultados indicaron que la composición de falso color (FCC) de las imágenes LANDSAT TM e IRS P6 fueron de mayor utilidad para interpretar y delimitar las altas y bajas planicies aluviales que para las otras unidades. El realce de contraste del FCC permitió que los números digitales (DN) fueran redistribuidos sobre la base de su frecuencia y que se ampliara la escala de grises a la mayor frecuencia de valores de DN en el histograma, perfeccionando la delimitación de las unidades. El realce digital de las imágenes se presenta en la figura 2 (a y b). Para diferenciar las áreas densamente cultivadas, tierras en barbecho, maleza y vegetación boscosa se requirió emplear un NDVI multitemporal (Figura 2c). El SBI, permitió mejorar el contraste del suelo y entender la relación suelo – paisaje presente en el área de estudio (Figura 2d). Estos índices fueron de mayor utilidad en la delimitación de las unidades fisiográficas del piedemonte y montañas residuales que en las otras unidades fisiográficas. El PCA fue usado para comprimir la información contenida en las diferentes bandas de las imágenes, en dos o tres componentes principales de la imagen. La imagen LANDSAT fue analizada con el PCA, obteniendo que el

componente principal (PC) ‘1’ expresó el índice de brillantez del suelo, el PC ‘2’ el índice de verdosidad y el PC ‘3’ concentra el ruido. Este análisis fue muy útil para la interpretación de la región fisiográfica de piedemonte (Figura 3a).

Las diferentes técnicas de PDI facilitaron la precisión de las delimitaciones e identificación de diferentes unidades de suelo. De esta forma, se generó una perspectiva en 3-D del área de estudio desde un modelo digital de elevación (DEM) para verificar visualmente la distribución de varias unidades fisiográficas (Figura 3b), permitiendo identificar a través de la forma de la superficie de la tierra, la transición del piedemonte a la planicie aluvial, así como analizar los procesos pedogenéticos de erosión que ocurren en la franja sur de las montañas residuales. A su vez, se obtuvieron cinco (5) clases de tipo de uso de la tierra a partir de una clasificación supervisada, siendo las tierras en barbecho, bosque, bordes del río, agricultura de alta y baja intensidad las clases encontradas (Figura 3c).

#### 3.2 Cartografía de suelos

La cartografía de los suelos es una evaluación sistemática, descriptiva, en donde se clasifica y cartografía el área del suelo de interés. Este reconocimiento comprendió la descripción de las unidades fisiográficas, así como la caracterización y clasificación del recurso suelo, con el propósito de ayudar a entender el suelo en cuanto a su génesis, desarrollo y características productivas.

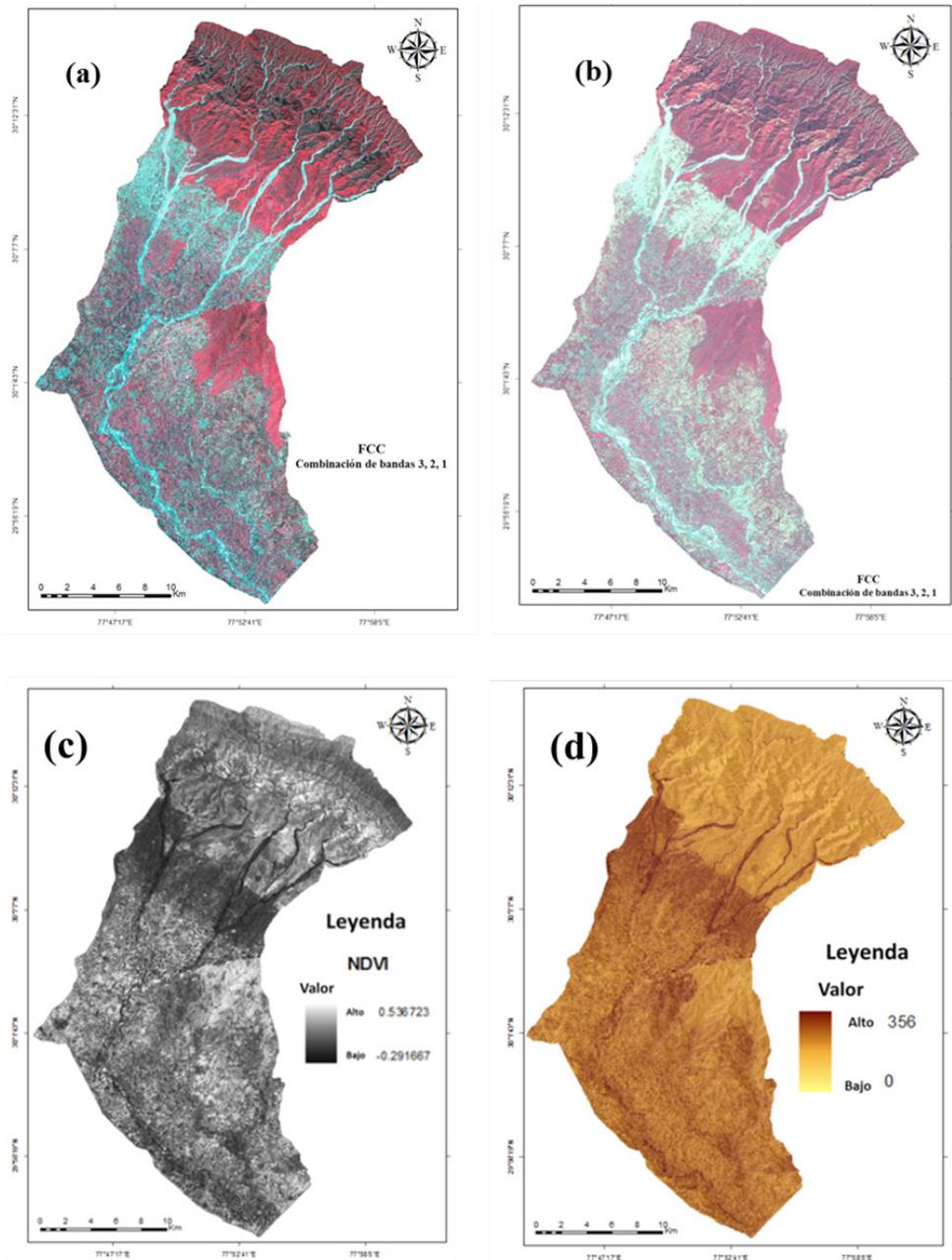


Figura 2. Procesamiento digital de imágenes (PDI) para el análisis fisiográfico de la cuenca Solani. Composición falso color de la imagen (a) LANDSAT TM (noviembre, 2000) y (b) IRS LISS III (octubre, 2005); (c) Relación de bandas (Band ratio) – NDVI; (d) Transformación de imagen - Índice de Brillantez del Suelo (SBI)

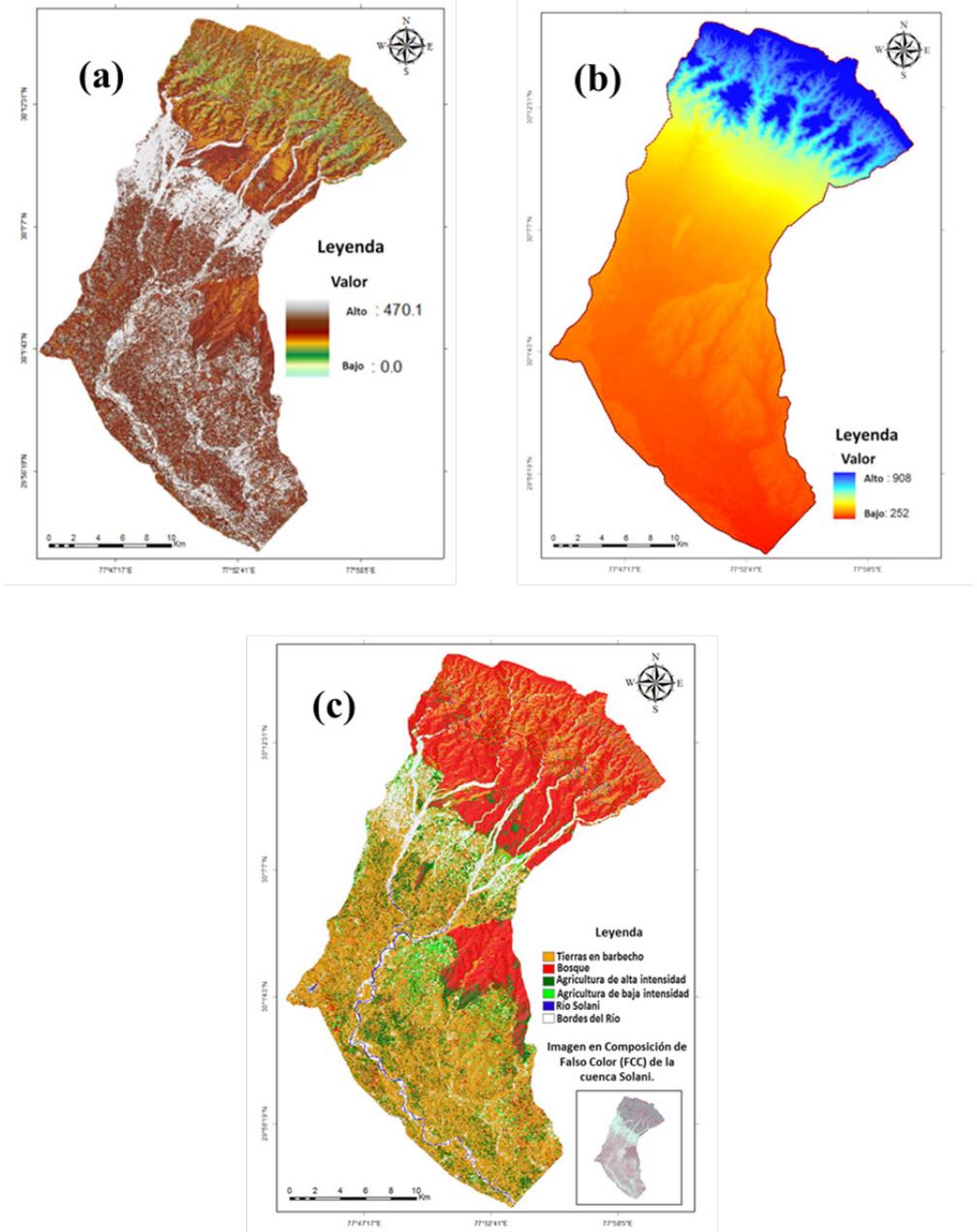


Figura 3. Procesamiento digital de imágenes (PDI) para el análisis fisiográfico de la cuenca Solani. (a) Análisis de Componentes Principales; (b) Modelo Digital de Elevación (MDE); (c) Transformación de la imagen-Clasificación supervisada

### 3.2.1 Análisis fisiográfico

El área de estudio está conformada por las montañas de Siwalik y la parte alta de la planicie del río Ganges, por lo tanto la fisiografía está principalmente influenciada o modelada por procesos denudacionales y coluviales en la parte superior, y por procesos de sedimentación en la parte baja. Un enfoque sistemático de interpretación de imágenes satelitales con ayuda de información como las cartas topográficas de India (1:50.000), mapas geológicos y datos climatológicos se utilizaron para clasificar las diferentes for-

mas de relieves del terreno. Basados en las variaciones fisiográficas, la cuenca Solani fue dividida en 5 (cinco) unidades fisiográficas. Los detalles de las unidades se muestran en el cuadro 1 y la figura 4. La interpretación de la información satelital y el subsecuente análisis en SIG arrojó que el 39% del área de estudio está bajo planicies aluviales, seguida por el piedemonte con un 24%, montañas de Siwalik con 24%, las colinas residuales con el 6% y el río Solani que abarca un espejo de agua del 6,7% de la superficie total del área.

**Cuadro 1. Unidades fisiográficas descritas**

Unidades fisiográficas	Posición relativa en el terreno	Vegetación	Símbolo	Área (ha)	(%)
Planicie aluvial	Alto	Cultivos intensivos	Ap11	848	1,7
		Cultivos intensivos de posición más baja	Ap12	1.215	2,4
		Cultivos de moderada intensidad	Ap13	330	0,7
		Plantaciones de posición alta	Ap14	1.749	3,5
		Cultivos de tierras onduladas	Ap15	263	0,5
		Cultivos en tierras erosionadas	Ap16	2.272	4,6
	Media	Cultivos intensivos de tierras altas	Ap211	3.450	6,9
		Cultivos intensivos de tierras bajas	Ap212	5.184	10,4
	Baja	Cultivos intensivos	Ap31	826	1,7
	Tarrazas fluvial	Cultivada	RT	178	0,4
	Planicie de inundación	Cultivada	FP	3.553	7,1
	Piedemonte	Alto	Bosque	P11	2.728
Cultivos de intensidad moderada			P122	1.559	3,1
Cultivos de baja densidad			P121	1.320	2,6
Malezas y barbechos de posición baja			P131	861	1,7
Malezas y barbechos de posición alta			P132	141	0,3
Bajo		Cultivado	P21	5.226	10,5
Montaña Siwalik	Alto	Bosque	SH1	6.105	12,2
	Bajo	Bosque	SH2	5.760	11,5
Colinas residuales		Bosque	Rh1	2.885	5,8
Río Solani		Espejo de agua	R	3.324	6,7
Total área de la cuenca del río Solani				<b>49.941</b>	<b>100</b>

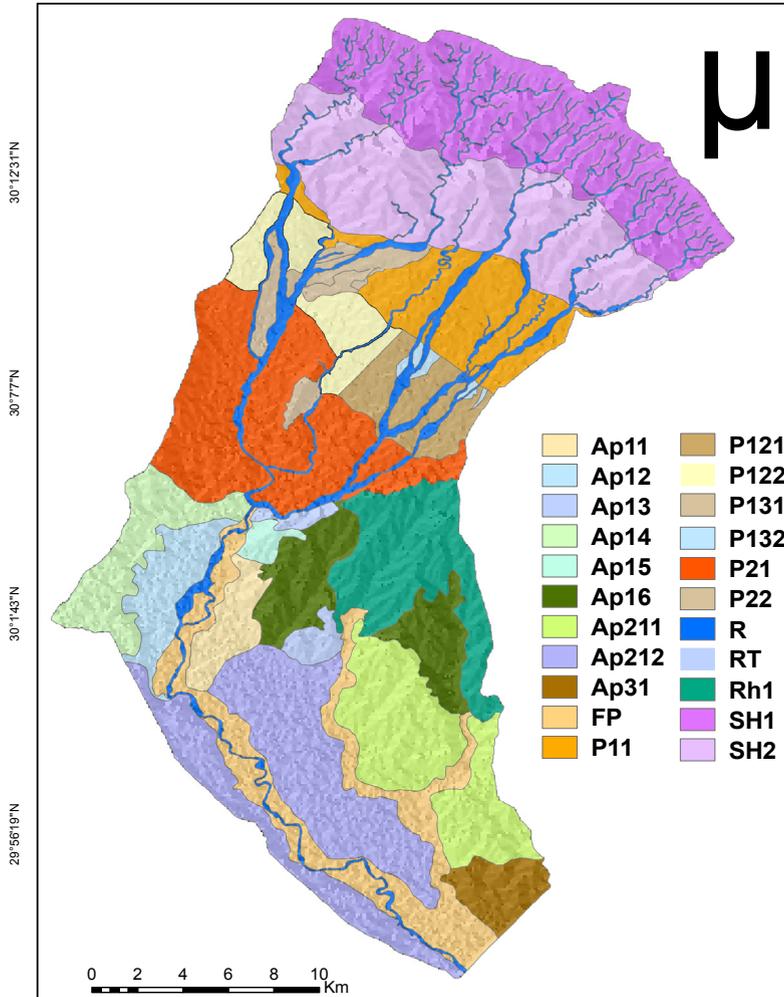


Figura 4. Mapa fisiográfico de la cuenca Solani

**3.2.1.1 Unidad fisiográfica Planicie Aluvial (Ap).** La planicie aluvial presenta una pendiente de ligeramente inclinada a plana, con algunas excepciones. Los materiales formadores de los suelos profundos son principalmente sedimentos depositados por el río Solani y sus tributarios. Esta unidad fisiográfica fue subdi-

vidida de acuerdo a su altura (msnm) y posición geomorfológica en planicie aluvial alta (Ap1), media (Ap2) y baja (Ap3). En la planicie aluvial alta encontramos suelos con condiciones de drenaje entre moderado a bien drenado con pequeños fragmentos gruesos. La intensidad del uso agrícola va de moderada a alta. En la

unidad se encontraron parches de tierras onduladas y tierras altamente erosionadas. Los suelos de la planicie aluvial media son de textura franco-arenosa a franca con pocos o ningún fragmento grueso; su condición de drenaje varía entre moderado a bien drenado. La planicie aluvial baja es la unidad más hacia el sur de la cuenca Solani, colindando con la planicie del río Ganges. Los materiales que son transportados por el río Solani y depositados en ésta unidad cartográfica, dan lugar a la formación de los suelos de textura más fina encontrados en la cuenca, presentando una textura franco-limosa sin fragmentos gruesos. Presentan condiciones de drenaje que van desde moderado a imperfectamente drenado presentando sistemas agrícolas diversos e intensivos.

Las terrazas fluviales (**RT**) y planicies de inundaciones (**FP**) también se delinearon en las geoformas aluviales, pero en pequeñas proporciones del área de estudio. Las planicies de inundación se encuentran tanto en el piedemonte como en las **Ap**. Las planicies aluviales son el resultado de la deposición de sedimentos arrastrados por el río Solani a lo largo de su trayectoria, formando cursos estrechos. Las FP poseen un bajo relieve y presentan gravas con matriz de arena y limo. Los materiales dejados por el río expresan un orden de depósito perpendicular al eje del río en función de su granulometría, los más gruesos se depositan al borde y los más finos a mayor distancia del borde del río. Las formaciones de las RT resultan del corte de las antiguas planicies aluviales realizado por el río.

**3.2.1.2 Unidad fisiográfica Piedemonte (P).** Al sur de la unidad de la montaña Siwalik está la unidad fisiográfica piedemonte, que presenta una ligera pendiente que va entre el 1 y el 3%. Esta unidad está subdividida en alto (P1) y bajo (P2) piedemonte, basado en la altura (msnm) y el uso de la tierra. El piedemonte alto contiene significativos fragmentos gruesos y su uso varía entre bosques y agricultura convencional, ambos variando en intensidad de uso. Se encontró que la pérdida del suelo superficial es un gran problema que afecta la unidad, ya que la vegetación natural ha sido sustituida por cultivos con un manejo de suelo no adecuado. La unidad de piedemonte bajo posee una menor proporción de fragmentos gruesos que el piedemonte alto, y presenta cultivos de moderada a alta intensidad de uso.

**3.2.1.3 Unidad fisiográfica Montañas de Siwalik (SH).** Esta unidad posee una moderada a fuerte pendiente del lado sur de la montaña Siwalik, con algunos espacios sin vegetación y el resto mayormente cubiertas por diferentes densidades de bosque. La unidad presenta rocas areniscas y limosas masivas y pobremente litificada. Esto consiste en camas de limos y arcillas con gravas y guijarros redondeados. La unidad fue subdividida en parte alta (SH1) y baja (SH2) basada en la pendiente y geo-localización.

**3.2.1.4 Las Colinas Residuales (RH).** Remontan su origen a la actividad tectónica que ha presentado la región del Himalaya y a los procesos fisiográficos de modelaje

superficiales. En la unidad se encontraron algunos pequeños fragmentos gruesos con suelos franco arenosos y una erosión de moderada a alta. Las RH están básicamente cubiertas por bosques con algunos parches de vegetación arbustiva y malezas.

### 3.2.2 Caracterización y clasificación del recurso suelo

Para la identificación y caracterización de las unidades cartográficas de suelo se describió, clasificó, reajustó y mapeó sis-

temáticamente las cualidades del suelo, con la ayuda de la interpretación de imágenes satelitales y los sistemas de información geográficos (SIG). Las características de las unidades se describen en la figura 5 a través de dos (2) transectas.

La parte alta de la cuenca Solani tiene una empinada a moderada pendiente. Los suelos en la unidad SH son diferentes a los del piedemonte y la planicie aluvial. Son pocos profundos y gravosos, ya que los principales factores formadores que condicionan su desarrollo son la pen-

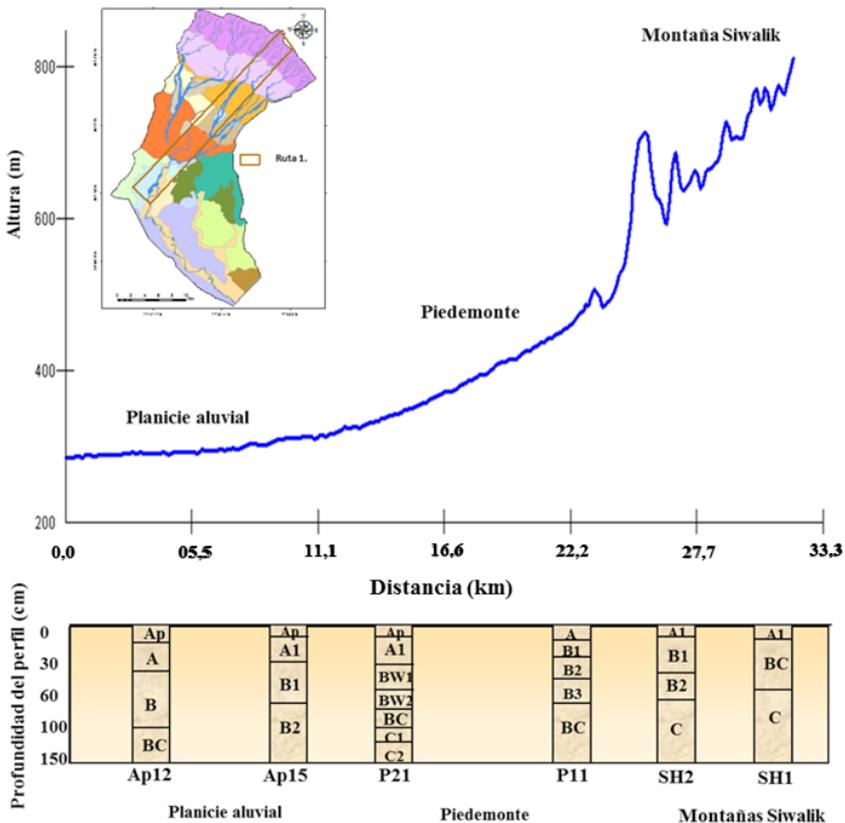


Figura 5. Descripción de las unidades fisiográficas de la cuenca Solani. Transecta 1

diente y la cobertura vegetal. Las áreas en las proximidades del río Solani y los riachuelos estacionales reciben sedimentos gruesos desde las montañas y parte alta del piedemonte, debido al gradiente de pendiente o inclinación. Los suelos en los cortes de las terrazas fluviales son diferentes a los suelos de la media y baja planicie aluvial. Los suelos en las terrazas son franco con fuerte estructura granular y abundante actividad microbiana. Debido al efecto de la nivelación de las aguas de inundación del río Solani, la

deposición de los materiales es de forma lateral, lo que conduce a la formación de la planicie aluvial. De menor amplitud se encuentran a lo largo del borde de la planicie aluvial, formado principalmente por los materiales más gruesos transportados por las turbulentas aguas.

Algunas características de los suelos de cada unidad se muestran en el cuadro 2. El área de estudio es de moderada a bien drenada. No se observó afloramientos rocosos en la planicie aluvial; sin embargo, en las montañas de Siwalik y el

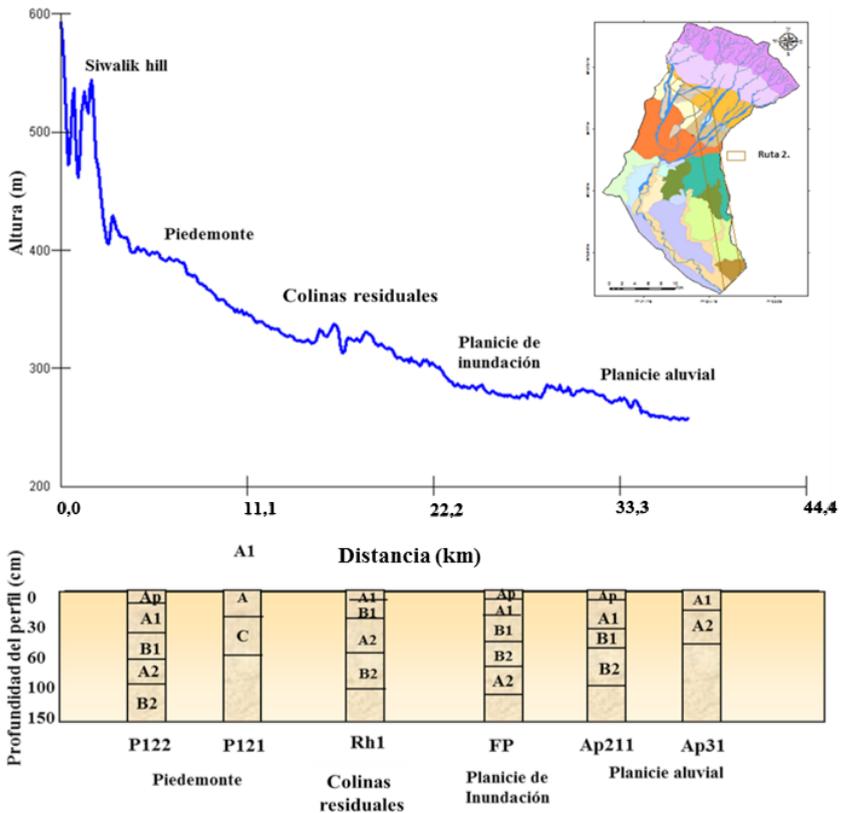


Figura 5. Transecta 2

**Cuadro 2. Algunas características de los suelos de las unidades pedogeomorfológicas, cuenca Solani**

Unidad cartográfica	Profundidad del suelo (cm)	Textura	Clase de Drenaje	Pendiente (%)	Erosión
P11	86	Fa	MBD	3 - 5	e1
Ap11, Ap13	100	Fa	BD	1 - 2	e1
P21	108 +	Fa	MBD	1	e1
P121	80+	Fa	MBD	1 - 3	e2
P122	60	Fa	BD	2	e3
P13	25	A	BD	1-2	e3
Ap12	90+	F	MD	1 - 2	e1
Ap14	100+	Fa	BD	1 - 2	e1
Ap15	100 +	F	BD	3 - 10	e3
Ap16	120+	Fa	BD	1-2	e3
Ap211	90+	Fa	BD	1 - 3	e2
Ap31	100+	FL	MD	1	e1
FP	100	F	MD	1	e1
Ap212	95+	F	MBD	0 - 1	e1
SH1	60	Fa	BD	30	e3
SH2	60+	Fa	BD	20 - 25	e3
Rh1	110	Fa	BD	1 - 3	e2
RT	180	F	MBD	0 - 1	e1

Texturas: fa (franco arenosa); F (franca); FL (franco limosa); a (arenosa). Erosión: e1 (ligera); e2 (moderada); e3 (severa). Clase de drenaje: BD (bien drenado); MBD (moderadamente bien drenado); MD (moderadamente drenado)

pedemonte plano, se encontró entre el 5 – 60% de pedregosidad superficial. Los materiales más finos fueron lavados en el último período geológico debido a procesos erosivos. Estos materiales en las partes más altas del área de la cuenca fueron depositados en la planicie aluvial. Los resultados indican que el 36% del área de estudio experimenta una severa erosión, mayormente localizada en la región de las montañas de Siwalik y la parte alta del pedemonte. En el 47 % de la cuenca Solani (planicie aluvial y pedemonte bajo), los niveles de erosión fueron suaves o nulos, con plantaciones perennes. El análisis

textural nos reveló que cerca del 22% del área de estudio posee una textura francosa. Otras clases texturales como la arenosa o franco-limosa también son comunes, pero se encuentran mayormente en la planicie aluvial baja. De acuerdo a los análisis de laboratorio, el 47 % de la cuenca Solani presenta un contenido de carbono orgánico superior a 0,8 %, encontrándose el valor más alto en las montañas de Siwalik (4,1 %), área cubierta por vegetación boscosa; así como en el pedemonte bajo (1,01 %), donde se tiene una alta intensidad de cultivos. Los niveles bajos de carbono orgánico (<0,4 %) se

observaron en los suelos poco profundos del piedemonte alto, en barbecho o áreas erosionadas.

**3.2.2.1 Clasificación taxonómica de los suelos de la cuenca solani.** Las unidades fisiográficas fueron comparadas con las descripciones pedológicas de los perfiles de suelo y su relación entre ellos, estableciendo así las unidades de suelo. Los suelos fueron clasificados de acuerdo a la décima edición de la clave para la taxonomía de suelos de la USDA del año 2006 (Cuadro 3). El análisis de los datos climáticos reveló que el área de estudio presenta una relativa homogeneidad en cuanto a precipitación y temperatura. Los principales factores que influenciaron la génesis de los suelos fueron el tiempo y la naturaleza del material parental. La temperatura promedio anual del área de estudio fue del orden de 24 °C. Con relación a la temperatura promedio, la temperatura de invierno y ve-

rano varió por más de 5 °C. Por lo tanto, el régimen de temperatura de los suelos del área calificó como isohipertérmico. De acuerdo a los datos de temperatura y precipitación, el régimen de humedad del suelo es Ustic.

La distribución espacial de las asociaciones de suelo de las unidades cartográficas del área de estudio se presenta en la figura 6. Esta distribución indica que la mayoría de las unidades fisiográficas se clasifican dentro de los Typic Haplustepts, siendo los dos principales órdenes de suelo del área de estudio los Entisoles e Inceptisoles. La clasificación de los suelos mostró que la mayoría de los suelos de las montañas de Siwalik son Typic Ustorthents, de franco gruesa a esquelética. Debido a las características morfológicas de la unidad, los procesos de erosión evitan en gran medida la formación de suelo.

La región del piedemonte muestra un poco más de desarrollo del perfil de suelo que los suelos de la montaña de Siwalik,

**Cuadro 3. Asociaciones de suelos de la cuenca Solani**

<b>Unidad Cartográfica</b>	<b>Clasificación taxonómica</b>
P21, Ap16, RT	Fluventic Haplustepts, francosa gruesa
P11, Ap14, Ap211, P122, P132, Ap11, Ap13	Typic Haplustepts, francosa gruesa
FP	Typic Ustipsamments, francosa gruesa
SH2	Typic Ustorthents, francosa gruesa
P22	Fluventic Haplustepts, francosa fina
Ap212	Typic Haplanthrepts, francosa fina
Rh1, Ap15, Ap12, Ap31	Typic Haplustepts, francosa fina
SH1, P121	Typic Ustorthents, esquelética francosa
P131	Typic Ustorthents, esquelética arenosa

Fuente: Soil Survey Staff, 2006

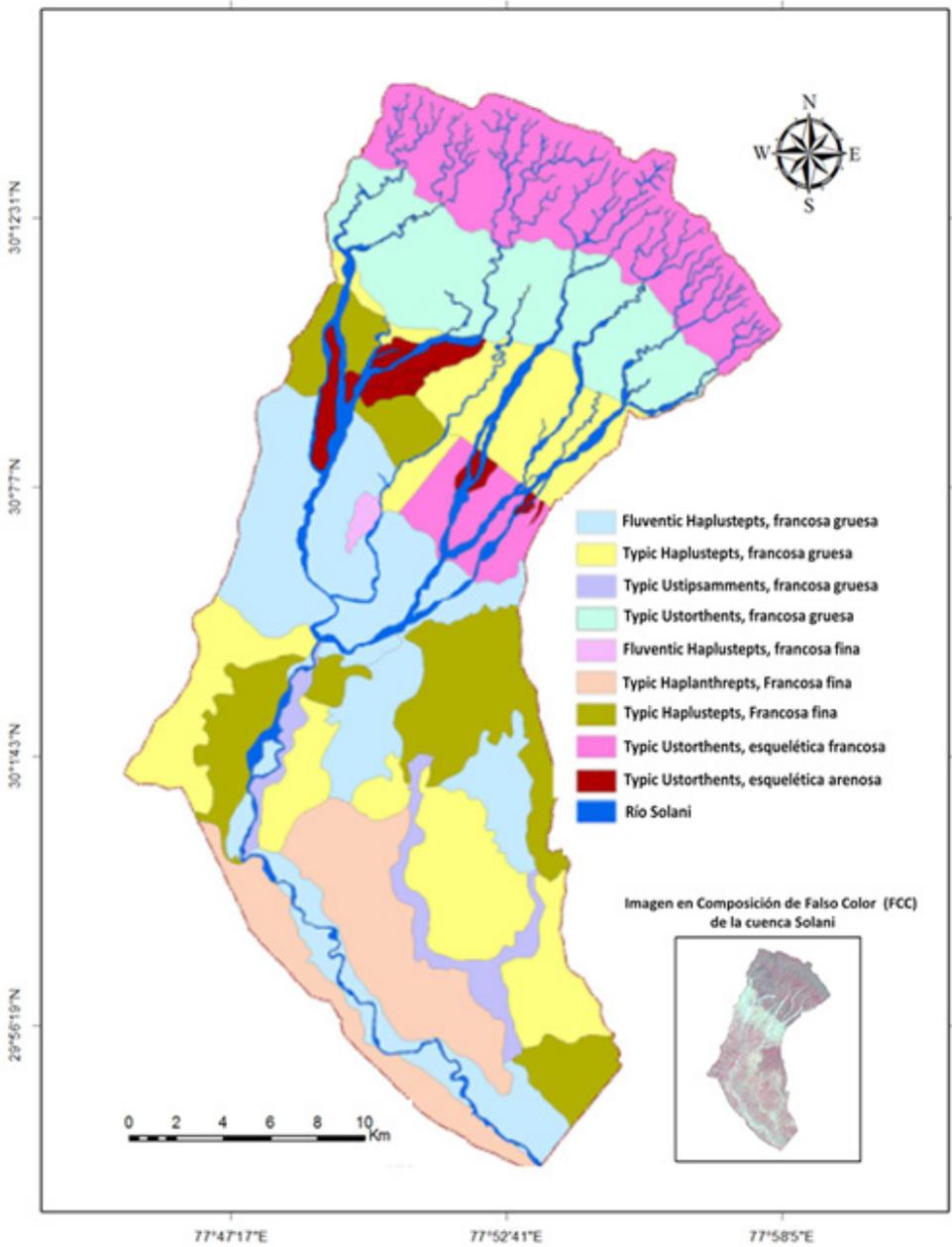


Figura 6. Clasificación de suelos de la cuenca Solani. India

siendo clasificados como Typic Haplustepts, francosa gruesa. Los suelos de la planicie aluvial son Inceptisoles y en algunas unidades se observaron las características de Fluventic (distribución irregular del CO a lo largo del perfil de suelo). Los suelos de la terraza y planicie aluvial fueron clasificados como Fluventic Haplustepts, encontrándose algunos asociados con los Typic Ustipsamments. Siendo la estratificación y ausencia de horizontes diagnósticos una clara evidencia para la identificación de los suelos de planicie, dado los aportes de sedimentación del río Solani y sus tributarios. Sin embargo, los suelos de una relativa mayor estabilidad (suelos de la planicie aluvial de mayor desarrollo), con una pendiente de suave a plana, muestran desarrollo de color y/o un horizonte estructural B (Cambico), debido a la relativa mayor percolación de agua a través del solum del suelo.

#### 4. Conclusión

La teledetección y los SIG han sido herramientas valiosas que permitieron sistematizar con mayor eficiencia la cartografía y la caracterización de los suelos de la cuenca Solani. El PDI de datos satelitales mejoró, en gran medida, la detección y delimitación de las unidades fisiográficas. El estudio de suelos a partir de las diferentes unidades fisiográficas reveló que la naturaleza del material parental, la topografía y el tiempo son los factores responsables de la diferenciación pedogenética. El trabajo estableció una bien definida relación entre la fisiografía y el

desarrollo de los suelos. La erosión de los suelos se presentó como el mayor problema en las montañas y el piedemonte, acelerado por la pérdida de cobertura de bosque. A su vez, las malas prácticas de conservación de suelos y el bajo contenido de carbono orgánico, obstaculizan la productividad de las tierras agrícolas del área de estudio.

#### 5. Reconocimientos

Los autores agradecen al *Indian Institute of Remote Sensing*, a la Agencia Bolivariana de Asuntos Espaciales y al Ministerio del Poder Popular para la Agricultura y Tierras (MPPAT) por su apoyo para la realización de este trabajo en la República de India.

#### 6. Referencias citadas

- ESHEL, G.; LEVY, G. & M. SINGER. 2004. *Spectral Reflectance Properties of Crusted Soils under Solar Illumination*. **Soil Science Society of American Journal**. 68: 1.982-1.991.
- HILWING, F. & R. KARALE. 1973. *Physiographic system and elements of photo-interpretation as applied to Soil Survey in Ganges Plain*. **Journal of the Indian Society of Remote Sensing**, 21: 205-212.
- JESTER, W. & A. KLIK. 2005. *Soil surface roughness measurement – methods, applicability, and surface representation*. **Catena**. 64: 174-192.
- LAGACHERIE, P.; BARET, F.; FERET, J.; MADEIRA, J. & J. ROBBEZ. 2008. *Estimation of soil clay and calcium carbonate using*

- laboratory, field and airborne hiperespectral measurements. Remote Sensing of Environment.* 112 (3): 825–835.
- LILLESAND, T.; KIEFER, R. & J. CHIPMAN. 2007. **Remote Sensing and Image Interpretation.** Wiley India Edition. New Delhi-India 763 p.
- MELÉNDEZ, I.; NAVARRO, J.; GOMEZ, I. & M. KOCH. 2008. *Identifying optimal spectral bands to assess soil properties with VNIR radiometry in semi-arid soils.* **Geoderma.** 147: 126-132.
- MOUAZEN, A.; KAROUI, R.; DE BAERDEMAEKER, J. & H. RAMON. 2006. *Characterization of Soil Water Content Using Measured Visible and Near Infrared Spectra.* **Soil Science Society American Journal.** 70: 1.295-1.302.
- SANTRA, P.; SAHOO, R.; DAS, B.; SAMAL, R.; PATTANAIK, A. & V. GUPTA. 2009. *Estimation of soil hydraulic properties using proximal spectral reflectance in visible, near-infrared, and shortwave-infrared (VIS–NIR–SWIR) region.* **Geoderma.** 152: 338-349.
- SELLITTO, V.; FERNÁNDEZ, R.; BARRÓN, V. & C. COLOMBO. 2009. *Comparing two different spectroscopic techniques for the characterization of soil iron oxides: Diffuse versus bi-directional reflectance.* **Geoderma.** 149: 2–9.
- STEVENS, A.; UDELHOVEN, T.; DENIS, A.; TYCHON, B.; LIOY, R.; HOFFMANN, L. & B. WESEMAEL. 2010. *Measuring soil organic carbon in croplands at regional scale using airborne imaging spectroscopy.* **Geoderma.** 158: 32-45.
- SOIL SURVEY DIVISION STAFF. 1993. *Soil survey manual.* Soil Conservation Service. U.S. Department of Agriculture **Handbook 18.**
- SOIL SURVEY STAFF. 2006. **Soil Taxonomy.** Tenth Edition. Dept. Agric. Soil Conserv. Serv. Agriculture Handbook, 332 p.
- VASQUES, G.; GRUNWALD, S. & J. SICKMAN. 2008. *Comparison of multivariate methods for inferential modelling of soil carbon using visible/near-infrared spectra.* **Geoderma.** 146: 14-25.
- VISCARRA, R.; WALVOORT, D.; MC BRATNEY, A.; JANIK, L. & J. SKJEMSTAD. 2006. *Visible near infrared, mid infrared or combined diffuse reflectance spectroscopy for simultaneous assessment of various soil properties.* **Geoderma.** 131: 59-75.
- XIANBIN, L.; XIUMEI, L.; XINGGU Z. & LONG Y. 2007. *Application of Satellite Remote Sensing data in an Investigation of land along a freeway.* **Data Science Journal,** (6): 548-552.

Fecha de culminación: abril, 2014

Lugar: Mérida - Venezuela