

# **D**ETERMINACIÓN Y COMPARACIÓN DE ÍNDICES DE EROSIÓN TEÓRICOS EN CUENCAS DEL FLANCO SURANDINO VENEZOLANO, APOYADO EN SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA Y PROGRAMACIÓN PYTHON

DETERMINATION AND COMPARISON OF THEORETICAL EROSION INDICES  
IN VENEZUELAN SOUTHERN-ANDEAN FLANK BASINS SUPPORTED IN GEOGRAPHICAL  
INFORMATION SYSTEMS AND PYTHON PROGRAMMING

**XAVIER BUSTOS C., MAURICIO BERMÚDEZ C.**

## **RESUMEN**

Una de las técnicas existentes para cuantificar los procesos de erosión sobre cuencas es mediante la determinación de los índices de erosión conocidos por sus siglas en inglés como SPI (*Stream Power Index*), que miden las tasas de erosión en unidades de potencia (vatio). Estos modelos que para sus cálculos involucran una serie de pasos documentados, pueden ser sistematizados y parametrizados con el fin de aplicarse a otras regiones delimitadas como es el caso de superficies de erosión. En los últimos años se ha notado una tendencia creciente en la adopción del lenguaje de programación *Python* como estándar en el área de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) tanto para *software* libre como propietario, ya que proveen de librerías desarrolladas en este lenguaje para abordar y simplificar problemas de aplicación específicos; la integración de este lenguaje con bases de datos geográficas (Geodatabase) ofrece un abanico de posibilidades que permiten potenciar y personalizar procesos de análisis espacial. Este trabajo plantea disponer de las ventajas ofrecidas por técnicas de programación acoplada a bases de datos para calcular y comparar índices de erosión teóricos aplicados a ocho cuencas del flanco surandino (Venezuela), las cuales además se caracterizan a través de las curvas de elevación-pendiente. Los resultados de estos índices que a su vez son normalizados por el área de cada cuenca indican que la mayor erosión correspondiente al índice Total (TSP) se presenta en la cuenca de mayor superficie conocida como Caparo

(~3.330 Km<sup>2</sup>); sin embargo, esta relación no se mantiene para los índices Unitario (USP) y de Esfuerzo cortante (SSP), en donde los valores mayores de erosión se concentran en la cuenca del río Canaguá (~523 Km<sup>2</sup>).

**Palabras clave:** Modelo, erosión, relieve, flanco surandino, Python, ArcPy.

## **ABSTRACT**

One of the existing techniques for quantifying the basin erosion processes is by determining of the erosion indices known as the Stream Power Index (SPI), which measure erosion rates in units of power (watts). These models that for their calculation involve a series of documented steps, can be systematized and governed by parameters in order to be applied to other delimited areas such as erosion surfaces. In recent years, there has been a growing trend in the adoption of the Python programming language as a standard in the area of Geographic Information Systems (GIS) for both free and holder software, since they provide libraries developed in this language with the goal to deal and simplify specific implementation problems; the integration of this language with the geodata base offers a range of possibilities that allow to enhance and to personalize processes of spatial analysis. In this paper, we propose to use the advantages offered by the programming techniques coupled to databases to calculate and compare theoretical erosion indexes applied to eight basins of the southern Andean flank (Venezuela), which are also characterized by slope-elevation curves. The results of these indexes which are normalized by the basin area, indicate that the highest erosion corresponding to the Total Stream Power (TSP) occurs in the basin of Caparo, the largest in area (~3.330 km<sup>2</sup>); however, this relation is not kept for the Unit Stream Power (USP) and Shear Stress Power (SSP) indexes, where highest erosion values are concentrated in the Canaguá basin (~523 km<sup>2</sup>).

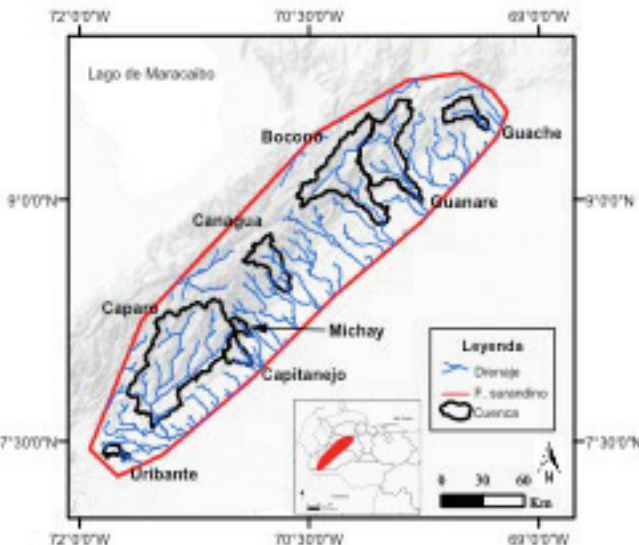
**Keywords:** Model, erosion, relief, southern-Andean flank, Python, ArcPy.

## INTRODUCCIÓN

Uno de los aspectos de interés en la geomorfología cuantitativa respecto al estudio de los procesos erosivos que modifican el paisaje es su cuantificación a través de índices de erosión (EI), los cuales miden la potencia o poder erosivo de ríos o arroyos (Bermúdez *et al.*, 2012; Whipple y Tucker, 1999) que transitan por las cuencas u otras áreas delimitadas como superficies de erosión (Bustos, 2014; Bustos y Bermúdez, 2015; Bustos *et al.*, 2013). Los índices a que nos referimos y cuyas aplicaciones se presentan en este trabajo son conocidos por sus siglas en inglés como *Stream Power Index "SPI"* y pueden ser trabajados de forma teórica o con precipitación y litología incluidas, para un análisis más preciso y completo.

Este trabajo tiene como objetivo principal calcular y comparar las tasas de erosión teóricas de las cuencas de los ríos Boconó, Canaguá, Caparo, Capitanejo, Guache, Guanare, Michay y Urbante cuyas ubicaciones se muestran en la figura 1, a través del desarrollo de programas implementados con el lenguaje de programación *Python* en conjunto con la librería *ArcPy* de *ArcGis* -Esri.

**Figura 1.**  
**Cuencas y drenaje presentes en el área de estudio (Bustos, 2016)**



## MARCO TEÓRICO Y METODOLÓGICO

A continuación se presenta un breve marco teórico sobre índices de erosión y su estimación de forma cuantitativa.

### *Índice de erosión “Stream Power Index –SPI–”*

De acuerdo a Wilson y Lorang (2000), el “SPI” es la medida del poder erosivo (vatios) del flujo del agua basado en la premisa que el caudal (descarga) es proporcional al área de captación específica ( $m^2$ ) y predice la erosión neta en áreas de perfil convexo y de convexidad tangencial (zonas de convergencia y de aceleración de flujo), así como la depositación (de sedimentos) neta en áreas de perfil cóncavo (zonas de disminución de la velocidad de flujo).

Valores altos de estos índices generalmente se corresponden con zonas montañosas, empinadas o de alta pendiente donde su incremento crea una mayor incisión o “corte” en el lecho y por tanto eleva los valores. Valores bajos se asocian a zonas de baja pendiente como a amplias llanuras aluviales, llanuras de inundación o áreas de lenta subsidencia. (Finnegan *et al.*, 2007).

Las leyes del poder de flujo describen la capacidad del canal de transportar sedimentos, así como su potencial de “incisar” su lecho, ampliar sus riberas (bancos) o incrementar la elevación del lecho rocoso debido a la depositación de sedimentos; son también de utilidad en la estimación de peligros de inundación. La incisión es controlada por varios factores (concavidad, erodabilidad del lecho rocoso, clima) y las ecuaciones que se presentan a continuación las reflejan ya que los cálculos consideran los siguientes parámetros: conservación de la masa de agua, la gravedad, hidrología de la cuenca, geometría hidráulica ( $Q$  descarga,  $S$  pendiente del canal,  $W$  ancho del canal), esfuerzo cortante o “*shear stress*”, entre otros (Whipple, 2004).

El análisis se basa en una predicción de la tasa de incisión en el lecho rocoso como una función de la potencia del flujo de agua (Finlayson *et al.*, 2002; Tucker y Whipple, 2002). La fórmula general es:

$$e = kA_s^m S^n \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde  $e$  refleja la tasa de incisión local,  $A_s$  es el área de drenaje (desagüe) aguas arriba (empleada como una aproximación para el caudal),  $S$  es el gradiente de la pendiente local,  $m$ ,  $n$  son constantes;  $k$  representa la dureza de la roca relacionado a la litología (Whipple, 2001).

Diferentes valores de  $m$  y  $n$  pueden ser usados dependiendo de la forma como son controladas las tasas de incisión de los ríos, tomando  $k=1$  se derivan las siguientes expresiones:

- Potencia Total del Flujo “*Total stream power*” (*TSP*): La erosión está controlada por la potencia o poder de flujo de agua que puede existir en la cuenca, en este caso  $m=1$  y  $n=1$ .

$$TSP = A_s S \tag{Ecuación 2}$$

- Potencia Unitaria del Flujo “*Unit Stream Power*”, (*USP*): La tasa de incisión está controlada por la amplitud o ancho del canal,  $m=1/2$ ,  $n=1$ .

$$USP = A_s^{1/2} S \text{ o } USP = A_s^{0.5} S \tag{Ecuación 3}$$

- Potencia de Corte del Flujo “*Shear Stress Power*”, (*SSP*): La incisión es controlada por la potencia del esfuerzo cortante,  $m=1/3$ ,  $n=2/3$ .

$$SSP = A_s^{1/3} S^{2/3} \text{ o } SSP = A_s^{0.33} S^{0.67} \tag{Ecuación 4}$$

**METODOLOGÍA**

Se parte de un Modelo Digital de Elevación (DEM) trabajado con una resolución espacial de 90 m, adquirido gratuitamente del “*GCIAR-CSI Consortium for Spatial Information*” de la Misión topográfica *Radar Shuttle* o SRTM (Jarvis *et al.*, 2008). Se construyen las Bases de Datos Geográficas (Geodatabases) con el fin de organizar toda la información, se emplea en este procesamiento el Lenguaje de Consulta Estructurado “*SQL*”. (Dobson,1999) y se emplean las funciones de la herramienta *Hydrology* (ArcGis.)

**HERRAMIENTAS GEOMÁTICAS DE DESARROLLO**

Para este trabajo se emplea el Programa ArcGis v 10.2 de Esri, que permite trabajar con el enfoque de Geodatabases que Zeiler (1999) define como “un modelo para el modelo de objetos geográficos, sus atributos, relaciones y comportamiento entre sus elementos”.

*Python* es un lenguaje de programación orientado a objetos “libre” que se ha posicionado como un estándar en el área geomática (van Rossum, 2009); es por ello que ESRI desarrolló la librería ArcPy con el objeto de construir “scripts” sencillos

y poderosos que simplifican la ejecución de tareas repetitivas mediante el uso de programas. Esta librería representa un conjunto de elementos propios de ArcGIS que completan la biblioteca de *Python*, dando con ello acceso desde la programación al manejo de información espacial. ArcPy se organiza en módulos, funciones y clases que invocan los comandos presentes en la caja de herramientas “Toolbox” del mencionado SIG (Pimpler, 2013).

## **Pasos para el cálculo de la erosión utilizando etapas de desarrollo de software**

Seguidamente se describe por etapas (Jacobson *et al.*, 2000) el proceso del cálculo de la erosión basado en la ecuación 2.

### ***Etapa de Análisis***

Se parte del Modelo Digital de Elevación (DEM) al cual se le deben eliminar los artefactos a través del comando Rellenar “*Fill*”, el producto de salida (DEM\_fill) es la entrada para el cálculo de la Dirección de Flujo “*Flow Direction*”, la salida (DEM\_dir) es la entrada para la determinación de la Acumulación de Flujo de agua “*Flow Accumulation*”; el resultado de aplicar este comando (DEM\_acc) se multiplica “*Times*”, por el tamaño de la celda para que la imagen represente unidades métricas, recordemos que el área acumulada se utiliza como una aproximación a la descarga, generando así la imagen que representa el factor  $A_s$  de la ecuación 1).

Seguidamente se debe generar la imagen correspondiente a la pendiente adimensional por ello se utiliza el comando Pendiente “*Slope*” en unidades de porcentaje multiplicándose por 0.01 con el fin de que este factor sea adimensional; con esto obtenemos el factor  $S$  de la ecuación 1. Con los factores  $A_s$  y  $S$  calculados procedemos a elevarlos a los coeficientes  $m$  y  $n$  que se indican en las ecuaciones 3 y 4. Una vez calculados los índices de erosión teóricos se aplica el comando de Estadísticas focales “*Focal Statistics*”, seleccionando círculos de radio 1-km, en donde se suman “*SUM*” los valores de los píxeles dentro del radio indicado. Una vista de la etapa de análisis siguiendo la notación del Lenguaje Unificado de Modelado (UML) se muestra en la figura 2A.

### ***Diseño***

En esta etapa se presentan los elementos del modelo identificados en la etapa de análisis asociados al lenguaje de programación a utilizar en la implementación. Las

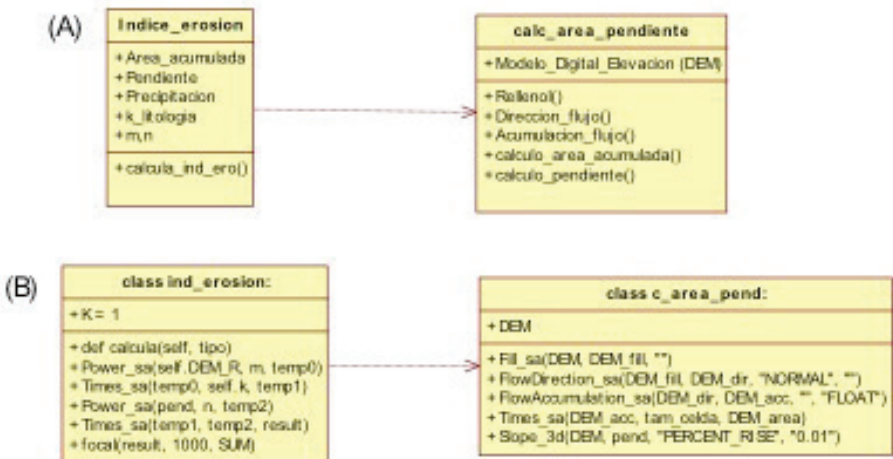
funciones empleadas de la librería ArcPy y una breve descripción de sus funciones se muestran en el siguiente cuadro:

**Cuadro 1.**  
**Funciones claves de la librería ArcPy empleadas**

Fill()	Corrige imperfecciones que puedan obstruir el flujo del agua.
FlowDirection()	Determinada la dirección del descenso desde una celda hacia sus vecinas de acuerdo a la pendiente.
FlowAccumulation()	Produce una imagen ráster de flujo acumulado para cada celda, determinado por la acumulación del peso de todas las celdas que fluyen hacia cada celda de pendiente descendente.
Slope()	Calcula la pendiente del terreno.
Times()	Multiplca dos imágenes ráster.
Power()	Eleva una imagen ráster a otra.
Focal()	Para cada celda de la imagen, calcula una estadística de los valores dentro de una vecindad especificada alrededor de ella.

El modelo de diseño, utilizando sintaxis del lenguaje *Python* se muestra en la figura 2.B.

**Figura 2.**  
**(A) Modelo de Análisis. (B)Modelo de Diseño. Notación UML. Elaboración propia**



## Implementación

La implementación se realizó empleando la versión del lenguaje de programación *Python 2.7* en combinación con la librería ArcPy de Esri. A continuación mostramos las rutinas y funciones de las dos clases mostradas en el diseño, comenzando por la clase `class_c_area_pend`.

```
import arcpy
...
class c_area_pend:
    def calc_area(self,p):
        # obtiene la dimension de la celda
        x = int(arcpy.Describe("DEM").meanCellWidth)
        y = int(arcpy.Describe("DEM").meanCellHeight)
        print "X_celda", x,"Y_celda y=", y
        area = x*y
        print"area de la celda=",area
        print "calculando, fill"
        arcpy.gp.Fill_sa("DEM", "DEM_fill", "")
        print "calculando, flow direction"
        arcpy.gp.FlowDirection_sa(„DEM_fill“, „DEM_dir“, „NORMAL“, „“)
        print „flow dir -Fow acc calculados“
        arcpy.gp.FlowAccumulation_sa(„DEM_dir“, „DEM_acc“, „“, „FLOAT“)
        arcpy.gp.Times_sa(„DEM_acc“, area, „DEM_area“)
        print „Factor As calculado“
    def calc_slope(self):
        print „calculando la pendiente adimensional= porc x 0.01“
        arcpy.Slope_3d(„DEM“, „pend_ad“, „PERCENT_RISE“, „0.01“)

        print "pendiente adimensional calculada"

...

```

Y el código asociado a la clase: `class_ind_erosion`, se muestra a continuación

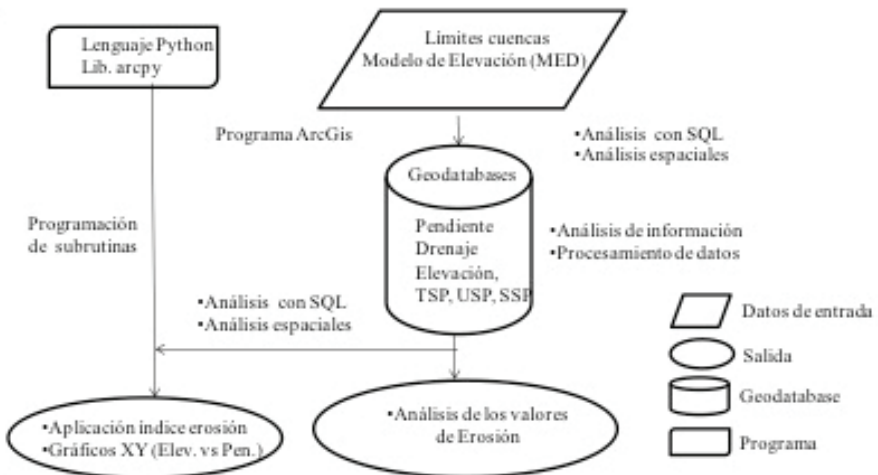
```

#####
## Clase: Índices de erosión
#####
class ind_erosion:
    k=1 #litología uniforme
    def calcula(self,tipo):
        DEM_R= "DEM_area" # representa el facto As
        if tipo=="tsp":
            m="1"; n="1"
        elif tipo=="usp":
            m="0.5"; n="1"
        else:
            m="0.33"; n="0.67"
        arcpy.gp.Power_sa(DEM_R, m, "temp0")
        arcpy.gp.Times_sa("temp0", k, "temp1")
        arcpy.gp.Power_sa("pend_ad", n, "temp2")
        arcpy.gp.Times_sa("temp1", "temp2", tipo)
        print "indice calculado..." +tipo

```

Un esquema simplificado que de la metodología se muestra en la figura 3.

**Figura 3.**  
**Esquema metodológico simplificado (Elaboración propia)**



## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se comienza con una caracterización de las mismas de acuerdo a atributos primarios de área, elevación, pendiente y la relación entre estos dos últimos parámetros.

### Elevación y pendiente

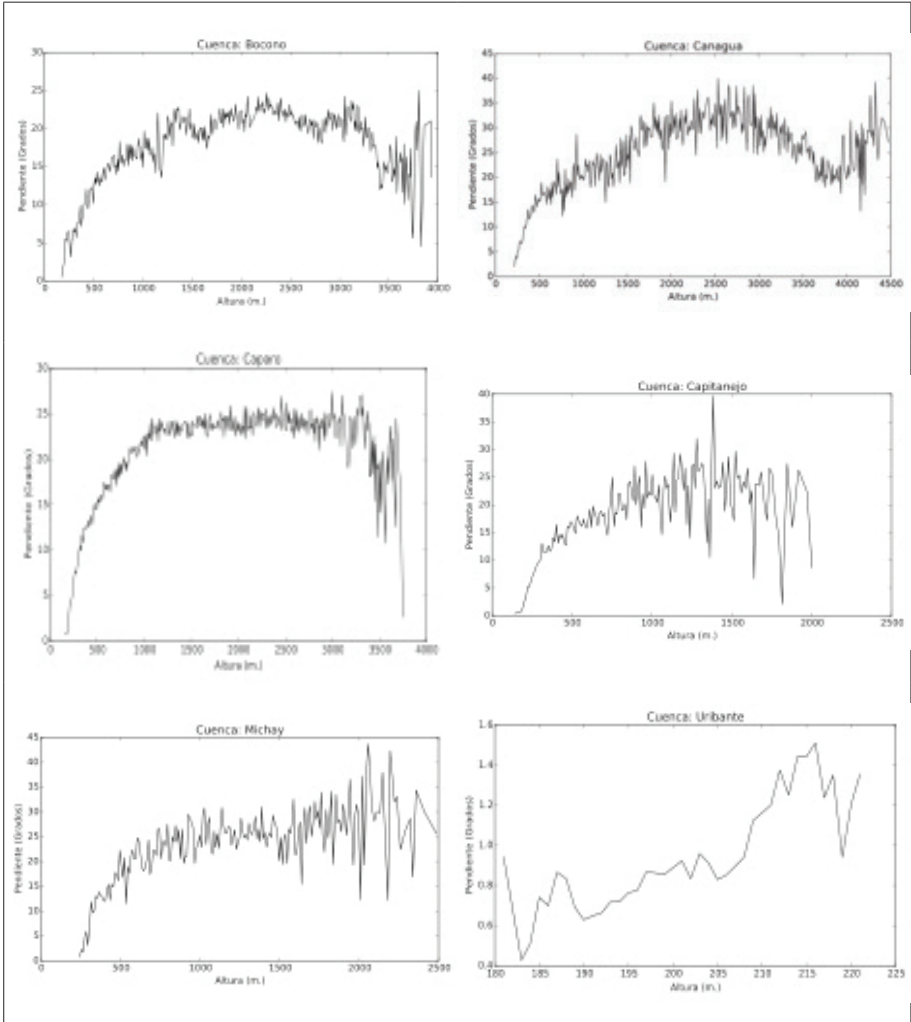
Los valores promedios obtenidos para la elevación, pendiente, así como el área de cada cuenca se presentan en el cuadro 2.

**Cuadro 2.**  
**Parámetros morfométricos de la cuenca**

Cuenca	Área (km <sup>2</sup> )	Elevación (m)				Pendiente (°)			
		Min.	Máx.	Media	Desv. est	Min.	Max.	Media	Desv. est
Boconó	1638,55	173	3930	1738,74	903,15	0	62	17,98	9,27
Canaguá	522,58	206	4505	1981,28	1301,45	0	69	22,10	11,01
Caparo	3329,83	169	3755	1276,79	785,31	0	73	19,65	9,38
Capitanejo	223,76	142	2001	441,14	329,39	0	43	10,42	9,07
Guache	329,35	212	1960	947,49	406,94	0	52	15,17	7,57
Guanare	1414,74	149	3092	1007,49	529,46	0	55	14,96	8,34
Michay	92,57	244	2486	1063,50	502,18	0	49	22,41	8,61
Uribante	92,11	181	221	198,46	7,07	0	5	0,84	0,68

La figura 4 muestra la relación entre la altura y la pendiente para algunas de las cuencas del flanco surandino.

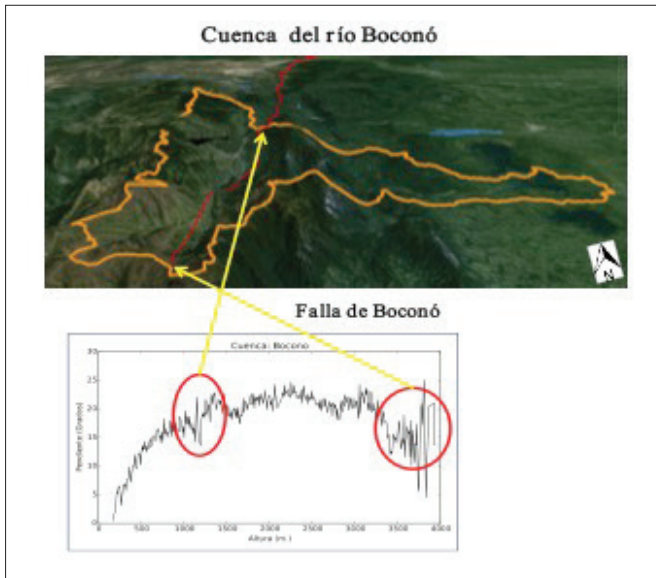
**Figura 4**  
**Gráficas de Elevación (m.s.n.m) vs Pendiente (°), cuencas del flanco surandino.**  
**Elaboradas con la librería Matplotlib de Python (Bustos, 2016)**



Determinación y comparación de índices de erosión teóricos en cuencas del flanco surandino venezolano, apoyado en sistemas de información geográfica y programación Python

A continuación se muestra una interpretación de la curva de Elevación vs Pendiente asociada a la cuenca del río Boconó: entre los aproximados 1000 a 1400 y 3300 a 3800 m.s.n.m se observan los “quiebres” de la falla que lleva el nombre de la cuenca (ver figura 5).

**Figura 5. Interpretación de la curva de elevación vs pendiente para la cuenca de Boconó. Fuente: imagen de satélite Landstat/ Copernicus en combinación color verdadero (2016) tomada de GoogleEarth y falla extraída del Mapa Geológico de Venezuela, Hackley et al. (2006)**



### ***Estudio de erosión a través de sus índices***

La erosión es un proceso acumulativo, razón por la cual se realiza la suma de píxeles para círculos de radio 1000 m (representada por la columna Suma); estos a su vez son normalizados por el área de la cuenca; con el fin de resaltar la propiedad. El cuadro 3 muestra los valores obtenidos para cada cuenca.

**Cuadro 3.**  
**Valores para índices de erosión teóricos (flanco surandino)**

	Cuenca	Mínimo	Máximo	Media	Des.est	Suma	Suma/ área
TSP	Boconó	0	6.89E+09	1.61E+08	5.47E+08	3.07E+13	18731.00
	Canaguá	1.08E+06	2.13E+09	1.16E+08	2.53E+08	7.08E+12	13557.16
	Caparo	2.48E+05	1.21E+10	2.60E+08	8.71E+08	1.01E+14	30220.45
	Capitanejo	2.67E+05	1.07E+08	1.55E+07	1.62E+07	4.02E+11	1798.76
	Guache	3.01E+05	7.62E+08	6.79E+07	1.26E+08	2.60E+12	7902.73
	Guanare	5.77E+05	8.33E+08	5.71E+07	1.01E+08	9.40E+12	6644.97
	Michay	2.09E+06	2.92E+08	4.35E+07	4.99E+07	4.69E+11	5063.16
	Uribante	1.26E+05	3.32E+07	4.29E+06	5.72E+06	4.60E+10	499.71
USP	Boconó	0.00E+00	2.66E+05	3.05E+04	2.34E+04	5.81E+09	3.54
	Canaguá	3.51E+03	1.65E+05	3.57E+04	2.50E+04	2.17E+09	4.15
	Caparo	6.50E+02	2.66E+05	3.41E+04	2.74E+04	1.32E+10	3.97
	Capitanejo	4.18E+02	4.13E+04	1.18E+04	9.05E+03	3.06E+08	1.37
	Guache	7.15E+02	7.48E+04	2.30E+04	1.20E+04	8.81E+08	2.67
	Guanare	6.42E+02	8.95E+04	2.12E+04	1.08E+04	3.49E+09	2.47
	Michay	4.61E+03	6.13E+04	3.12E+04	1.05E+04	3.36E+08	3.63
	Uribante	3.97E+02	3.69E+03	1.27E+03	6.44E+02	1.36E+07	0.15
SSP	Boconó	0	1.62E+04	5.12E+03	2.03E+03	9.76E+08	0.60
	Canaguá	1.20E+03	1.33E+04	5.71E+03	2.38E+03	3.48E+08	0.67
	Caparo	3.73E+02	1.43E+04	5.37E+03	1.94E+03	2.08E+09	0.63
	Capitanejo	2.73E+02	6.76E+03	2.60E+03	1.62E+03	6.78E+07	0.30
	Guache	3.96E+02	8.68E+03	4.34E+03	1.46E+03	1.66E+08	0.50
	Guanare	3.39E+02	1.09E+04	4.17E+03	1.40E+03	6.87E+08	0.49
	Michay	1.28E+03	9.09E+03	5.63E+03	1.39E+03	6.06E+07	0.65
	Uribante	2.63E+02	9.81E+02	5.23E+02	1.27E+02	5.60E+06	0.06

Fuente: Bustos (2016).

Respecto al Índice TSP “*Total Stream Power*”, la cuenca con mayor erosión relativa es Caparo con 30.220,45 y con la menor es Uribante con 499,7.

Respecto al Índice USP “*Unit Stream Power*” teórico, la cuenca con mayor erosión relativa es Canaguá = 4.15 y la menor con la Uribante = 0.15.

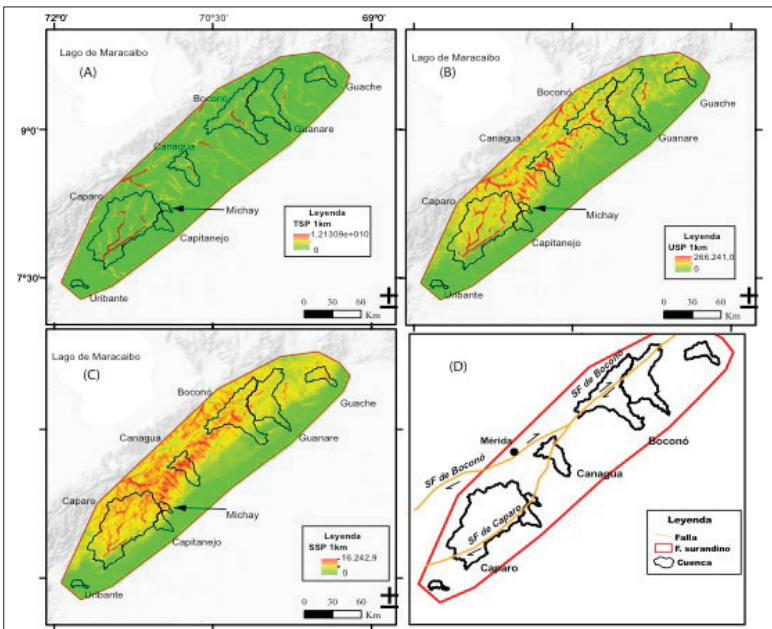
Respecto al Índice SSP “*Shear Stream Power*” teórico, la cuenca con mayor erosión relativa es Canaguá = 0.67 y con la menor es Uribante = 0.06.

La figura 6 A, B y C muestra las tasas de erosión correspondientes a los índices TSP, USP y SSP teóricos para el área de estudio correspondiente a este flanco.

**Figura 6.**

**(A) TSP Teórico, (B) USP Teórico, (C) SSP Teórico, (Bustos, 2016) (D) Fallas principales presentes del área de estudio**

**Fuente: Mapa neotectónico de Venezuela**



Xavier Bustos C., Mauricio Bermúdez C.

**CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

Con respecto al estudio geomorfológico cuantitativo y estimación de la erosión, se concluye lo siguiente:

- El trabajar con valores de erosión normalizados (relativos al área de cada cuenca) nos permitió una óptima comparación de la erosión de una cuenca respecto a sus vecinas, ya que la cuenca con mayor superficie no es la que necesariamente representa la de mayor erosión del flanco.
- Las gráficas de pendiente vs elevación nos permite identificar con precisión la existencia de rasgos geomorfológicos como fallamientos, se destaca el ejemplo realizado para la falla de Boconó.

Con respecto al tópico geomático-computacional

- La utilidad de emplear una metodología de desarrollo de software que además permitió documentar el proceso en la construcción de índices de erosión.
- La evolución y soporte ofrecido por la librería ArcPy; permitió simplificar el proceso de cálculos de estos índices y reducir la posibilidad de cometer errores.
- Este desarrollo hace más expedito y simple además la simulación de diferentes escenarios para el cálculo de la potencia erosiva.

## Recomendaciones

Para un modelado real de la erosión es recomendable incluir en el cálculo de estos índices las variables precipitación y litología, lo cual actualmente está en proceso.

## AGRADECIMIENTOS

Al Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico (CDCH) de la Universidad Central de Venezuela por el financiamiento otorgado al proyecto PI.21-8659-2013/1 titulado *Relación clima-tectónica y procesos superficiales en el norte de Suramérica, mediante geomorfología, termocronología cuantitativa y geomática.*

Al Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico (CDCH) de la Universidad Central de Venezuela por el financiamiento otorgado al proyecto PG 08-8273-2011 titulado *Determinación de la relación entre relieve, clima, tectónica y biodiversidad en orógenos circundantes a la cuenca del río Orinoco mediante métodos multiherramientas.* Al Proyecto interinstitucional Ministerio de Ciencia y Tecnología (FONACIT) y Petróleos de Venezuela titulado *Geociencia Integral de Los Andes de Mérida (GIAME)* otorgado a FUNVISIS.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BERMÚDEZ, M.A, VAN DER BEEK, P.A., BERNET, M. (2012). Strong tectonic and weak climatic control on exhumation rates in the Venezuelan Andes. *Lithosphere* v.5, p.3-16.doi: 10.1130/L212.1.
- BUSTOS, X. (2016). *Estudio de procesos de erosión hídrica al nor-oeste de la cuenca del Río Orinoco, empleando geomorfología cuantitativa, geomática y programación orientada a objetos*. Trabajo de Ascenso para ascender a la categoría de profesor Titular. Universidad Central de Venezuela. Facultad de Humanidades y Educación. Escuela de Geografía.
- BUSTOS, X. (2014). *Caracterización de las superficies de erosión en los andes del norte a través de métodos numéricos termocinemáticos y geomáticos*. Tesis Doctoral. Postgrado en Ciencias de la Computación UCV. Caracas, Venezuela.
- BUSTOS, X. & BERMÚDEZ, M. (2015). Caracterización de las superficies de erosión en los andes del norte a través de métodos numéricos termocinemáticos y geomáticos. Cuaderno CENAMB ISBN: 978-980-12-8100-9.
- BUSTOS, X., BERMÚDEZ, M.A, BERNET, M., TORO, G.E., ROJAS, O., MARÍN, M.I (2013). Caracterización de superficies de erosión mediante geomorfología cuantitativa Altiplano Antioqueño Cordillera Central de Colombia. *Revista Terra Nueva Etapa* v. XXIX (46) p. 43-67.
- DOBSON, R. (1999). *Programación avanzada con Microsoft Access 2000*. Microsoft Press. Mc-Graw Hill / Interamericana. ISBN: 84-481-2528-2.
- FINLAYSON, D., MONTGOMERY, D., HALLET, B. (2002) Spatial coincidence of rapid inferred erosion with young metamorphic massifs in the Himalayas. *Geological Society of America. Geology*; v.30, (3).
- FINNEGAN, N. J., SKLAR, L., FULLER, T. K. (2007). Interplay of sediment supply, river incision, and channel morphology revealed by the transient evolution of an experimental bedrock channel. *J. Geophys. Res.*, 112, F03S11, doi:10.1029/2006JF000569.

- HACKLEY, P.C., URBANI, F., KARLSEN, A., GARRITY, C.(2006). *Mapa geológico de Venezuela*. open file 2005-1038. USGS, 2 P.
- JACOBSON, I. BOOCH, G. RUMBAUGH, J. (2000). *El Proceso Unificado de Desarrollo de Software*. Addison-Wesley Object Technology Series. Publishing Company.
- JARVIS, A., REUTER, H.I., NELSON, A., GUEVARA, E. (2008). *Hole-filled SRTM for the globe Version 4, available from the CGIAR-CSI SRTM 90m Database*. Documento en línea. Disponible en: <http://srtm.csi.cgiar.org>[Consultado: 2016 julio, 01].
- PIMPLER, E. (2013). *Programming ArcGis 10.1 with Python Cookbook*. Packt Publishing.ISBN 978-1-84969-444-5
- TUCKER, G. & WHIPPLE, K. (2002). Topographic outcomes predicted by stream erosion models: Sensitivity analysis and intermodal comparison, *J. Geophys. Res.*,10.1029/2001JB000162.
- VAN ROSSUM, G. (2009). *El tutorial de Pyhton*. Python Software Foundation. Documento en Línea. Disponible en: <http://python.org.ar/wiki/Tutorial> [Consultado: 2016 junio, 01].
- WHIPPLE, K. (2001). Fluvial landscape response time: How plausible is steady-state denudation? *American Journal of Science*, v.301, p.313-325.
- WHIPPLE, K. (2004). Bedrock Rivers and the geomorphology of active orogens. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, v.32, p.151–185.
- WHIPPLE, K. & TUCKER, G. (1999). Dynamics of the stream-power river incision model: Implications for height limits of mountain ranges, landscape response timescales, and research needs, v.104, (B8), p. 17,661-17,674.
- WILSON, J.P., & LORANG M.S. (2000). Spatial Models of Soil Erosion and GIS. *Spatial Models and GIS: New Potential and New Models*, p.83-86.
- ZEILER, M. (1999). *Modeling our World*. Environmental System Research Institute, Inc. 380, New York, St. Redlands, California, 92373-8100, USA.

**XAVIER BUSTOS C.** Licenciado en Computación, Universidad Central de Venezuela (1994). *Magister Scientiarum* en Ciencias de la Computación, Universidad Central de Venezuela (2000). Doctor en Ciencias de la Computación, Universidad Central de Venezuela (2015). Actualmente Profesor titular en pre y postgrado de la Escuela de Geografía y en el Centro de Estudios Integrales del Ambiente de la Universidad Central de Venezuela.

*xavierbustos@gmail.com*

**MAURICIO A. BERMÚDEZ C.** Licenciado en Matemáticas, Universidad Central de Venezuela (1998). *Magister Scientiarum* en Matemáticas, Universidad Central de Venezuela (2002). Doctor en Ciencias de la Tierra, Université Grenoble Alpes (2010). Profesor Asociado en pre y postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Central de Venezuela hasta el año 2015. Profesor en la Universidad de Ibagué, Colombia (2016).

*maberce@yahoo.com*