

Paladini San Martín, B. y Cámara Artigas, R. (2010): Aplicación de las TIG a la ordenación de los recursos naturales y a la elaboración de cartografía de riesgos erosivos en el litoral de Paraíba (Brasil). En: Ojeda, J., Pita, M.F. y Vallejo, I. (Eds.), *Tecnologías de la Información Geográfica: La Información Geográfica al servicio de los ciudadanos*. Secretariado de Publicaciones de la Universidad de Sevilla. Sevilla. Pp. 988-999. ISBN: 978-84-472-1294-1

## APLICACIÓN DE LAS TIG A LA ORDENACIÓN DE LOS RECURSOS NATURALES Y A LA ELABORACIÓN DE CARTOGRAFÍA DE RIESGOS EROSIVOS EN EL LITORAL DE PARAÍBA (BRASIL)

*Paladini San Martín, Bilal<sup>1</sup> Cámara Artigas, Rafael<sup>2</sup>*

<sup>(1)</sup> Becario de la Agencia Española de Cooperación Internacional (MAEC-AECI). [bilalpaladini@hotmail.com](mailto:bilalpaladini@hotmail.com)

<sup>(2)</sup> Profesor titular de la Universidad de Sevilla. [rcamara@us.es](mailto:rcamara@us.es)

### RESUMEN

Esta comunicación tiene como fin presentar las herramientas TIG utilizadas para la elaboración de un trabajo fin de máster cuyo objetivo principal es realizar una propuesta de protección para la conservación de los hábitats y el fomento de la conectividad entre las áreas núcleo o fuente mediante el establecimiento de corredores ecológicos a través de la ordenación de recursos naturales fomentando el desarrollo sustentable de las comunidades locales afectadas por el riesgo de voçorocas.

Para la elaboración tanto de la cartografía de ordenación como de la cartografía de riesgos fue necesario realizar una reclasificación de los usos del suelo usando las imágenes satélite Landsat ETM+ febrero 2002 (201/034 Resolución píxel 30m./pancromática 20m./píxel.) Como la imagen satélite que disponemos no es de gran precisión para distinguir el diferente grado de cobertura vegetal, se ha utilizado un mosaico de foto aérea colorida para corregir el mapa de usos del suelo generado tras la reclasificación de imagen satélite.

En un principio el formato utilizado para la realización de la cartografía de riesgos fue vectorial, el cual no es apropiado para trabajar con pendientes ya que los mapas de pendientes en este formato distorsionan la forma real de las mismas, en la fase actual de la investigación se está pasando toda la información a formato Raster.

Palabras Clave: Voçoroca, reguero, erosión lineal, MDE, Reclasificación.

### ABSTRACT

*The aim of this article is to present the GIS tools used in a master project. The principal aim of this project is to make a habitat protection proposal in order to connect reservoirs through ecological corridors by zoning the land uses and promoting the sustainable development of the local communities affected by the risk of voçorocas and other erosion processes.*

*A reclassification on a Landsat ETM+ February 2002 (201/034 Resolution pixel 30m./panchromatic 20m./pixel.) was made to know the land uses, after that, we needed to compare this one with a mosaic of*

*aerial photography to correct the generated map because of the poor precision of the Landsat image.*

*In the beginning the format used to generate the cartography was vectorial but we realised that is inappropriate to work with slopes because they deform the reality. Nowadays we are converting all the information to raster.*

**Key Words:** Voçoroca, rill, linear erosion, DEM, Reclassification.

## 1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de voçorocas constituye un importante riesgo geomorfológico en la zona intertropical que afecta a la población humana y a sus actividades ya que suponen una pérdida de suelos cultivables así como una amenaza a las infraestructuras.

El objetivo general de este Trabajo Fin de Máster es realizar una propuesta de protección para la conservación de los hábitats y el fomento de la conectividad entre las áreas núcleo o fuente mediante el establecimiento de corredores ecológicos a través de la ordenación de recursos naturales fomentando el desarrollo sustentable de las comunidades locales afectadas por el riesgo de voçorocas.

Para ello se aportará como resultado una cartografía de ordenación de los recursos naturales a escala 1:25.000 con aplicaciones a la conservación del litoral y prevención de riesgos geomorfológicos asociados al desarrollo de voçorocas en la Formación *Barreiras* del litoral sur del Estado de Paraíba (Nordeste de Brasil).

## 2. ZONA DE ESTUDIO

### 2.1 Localización del área de estudio.

El área de estudio a detalle se sitúa sobre un asentamiento rural de poco menos de 15 km<sup>2</sup> y está dividida en 110 parcelas de unas cinco hectáreas cada una.



**Figura 1.** Localización del área de estudio.

### 2.2. Caracterización física del área: caracterización geológica, geomorfológica, hidrológica, climática y vegetación.

El área de estudio general comprende unos 150 km<sup>2</sup> que se corresponden con la Formación *Barreiras* del litoral sur del Estado de Paraíba. La Formación *Barreiras* comprende sedimentos limo-arcillosos y arenosos mal seleccionados, con líneas de gravas, sin estratificación. Durante la deposición de esos sedimentos ocurrieron fluctuaciones climáticas entre el clima húmedo y el semiárido. El modelo de las vertientes del *plan alto* costero en la parte sur del litoral de Paraíba presenta vertientes predominantemente convexas propensas a ser seccionadas por surcos y largos regueros originados por la concentración de la arroyada. Las concreciones lateríticas de media pendiente actúan como una capa impermeable y hacen surgir las aguas subsuperficiales (Carvalho, 1982). El período más lluvioso ocurre de marzo a julio, el período más seco se

extiende de septiembre a diciembre. (Furrier et al., 2006). La pluviosidad media anual está en torno a 1700 mm.

Las formaciones vegetales presentes en el área del estudio son el cerrado y la mata atlántica. El **cerrado** es una formación de bosque de cobertura cerrada (**cerradão**) con una altura de 5-10 metros, que puede presentarse con coberturas más abiertas en forma de sabana arboladas o boscosas (**campo cerrado**) y sabanas herbáceas (<15% de recubrimiento de leñosas arbóreas o arbustivas) que reciben el nombre de **campo limpo**. (Constituye una formación vegetal con un régimen ecodinámico mesófilo de subhúmedo a húmedo (Díaz del Olmo, F. Cámara Artigas, R, 2004), con especies perennifolias y algunas especies caducifolios en el cerrado subhúmedo, caracterizado por presentar sus especies constitutivas hoja mediana a pequeña, algunas coriáceas, y por la presencia de lianas y epífitas.

La **mata atlántica** es una formación de bosque de régimen ecodinámico ombrófilo (Díaz del Olmo, F. Cámara Artigas, R, 2004) que recibe el nombre común de selva húmeda. Su altura alcanza los 30 metros con presencia de epífitas y lianas.

La deforestación de las formaciones vegetales de mata atlántica que existían en el *tabuleiro* en condiciones de suelos más propicios para su desarrollo, da lugar a la erosión del suelo al quedar desprotegido o al aporte de substrato arenoso por escorrentía, favoreciendo por ésta razón y por las condiciones bioclimáticas más xéricas (3 a 4 meses de paralización vegetativa por causas hídricas) el desarrollo de vegetación cerrado en las de menos degradación hasta las de campo limpio en las de mayor degradación.

La vegetación natural de Mata Atlántica existente antes de la llegada de los colonizadores europeos al litoral Paraíba se ha reducido al 0,6%. (SUDEMA, 2004). Esta formación boscosa ha sido sustituida por caña de azúcar, bambú, piña, mandioca, coco, maracuyá, manga y otros cultivos tradicionales principalmente.

### 3. METODOLOGÍA

En primer lugar, se realizó una clasificación de los usos del suelo a través de fotointerpretación de foto aérea de 1970, 1985 y de la imagen satélite de 2002 para conocer la interrelación entre el cambio de uso de suelo y la aparición de morfologías de erosión de voçorocas.

A partir de la cartografía elaborada por los usos del suelo o vegetación de nuestra zona de estudio, se ha levantado mediante el software Idrisi-Klimanjaró de tratamiento de información en formato Ráster la cartografía de ordenación de los recursos naturales.

Para la realización de la cartografía se siguió el siguiente proceso:

1. Georreferenciación de las fotografías aéreas en blanco y negro de 1985 en base a las imágenes satélite Landsat 2001, para lo que utilizamos el SIG "ArcGis 9.2".
2. Fotointerpretación de las imágenes para hacer una clasificación por usos del suelo o vegetación. Tras esto, se han obtenido las categorías anteriormente señaladas.
3. El siguiente paso es la exportación de estas categorías de usos del suelo a cada una de las bandas del espectro electromagnético de las imágenes satélite para realizar una clasificación con el módulo MAXLIKE del SIG Idrisi.
4. Por último con el módulo área hallamos la superficie que ocupa cada categoría de protección. (Cartografía Categorías de Ordenación de Recursos Naturales para el ámbito de la propuesta.)

En segundo lugar, Se desarrolla una cartografía de riesgos por erosión asociada a flujos concentrados (procesos de *voçorocamiento*). Los lugares susceptibles o vulnerables a desarrollar voçorocas son los campos de cultivo u otros usos del suelo que dejan la superficie expuesta y desprotegida ante la acción de los flujos concentrados de agua. Para tener esta información fue necesario realizar una reclasificación con imagen satélite (del año 2002) del área de estudio.

Según la metodología de Guerra (1999), las áreas que presentan pendientes de hasta 6,85° se consideran de peligrosidad baja ante procesos de *voçorocamiento*, entre 6,85° y 11,3° la peligrosidad es media y con más de 11,3° es alta. Para tener mapas de pendientes de los asentamientos fue necesario generar un mapa de pendientes con el módulo SLOPE en "ArcGis 9.2" a través del MDE.

Los lugares que presentan peligrosidad ante estos procesos son las áreas de cabecera de drenaje sobre formaciones de textura arenosa y áreas con importantes precipitaciones que es el caso de nuestra área de estudio. Las áreas de cabecera de drenaje fueron digitalizadas.

Por tanto, la intersección de las áreas de cabecera de drenaje en zonas desprovistas de vegetación (susceptibilidad) con áreas de diferentes pendientes (peligrosidad) nos dará la cartografía de riesgos por procesos de *voçorocamiento* o erosión lineal.

Las fuentes cartográficas, fotográficas e imágenes de satélite utilizadas han sido:

Cartografía topográfica 1.25.000 Ministerio do Interior – Superintendencia do desenvolvimento do Nordeste. (SUDENE 1974) en base a la fotografía aérea de 1970.

- Vuelo fotogramétrico 1:40.000 sin orto-rectificar en blanco y negro de 1985. INTERPA. Gobierno estadual de Paraíba.
- Landsat ETM+ febrero 2002 (201/034 Resolución píxel 30m./pancromática 20m./píxel).
- Spot febrero 2002. Resolución 20 m./píxel./pancromática 10 m/píxel).
- MDE. Resolución 30 m./píxel [www.glcg.umiacs.umd.edu](http://www.glcg.umiacs.umd.edu)

Las cabeceras de drenaje fueron digitalizadas para la realización del mapa geomorfológico, cuatro categorías fueron establecidas: regueros, reguero en cabecera de *voçoroca*, regueros de vertiente y *voçorocas*. (Figura 2).

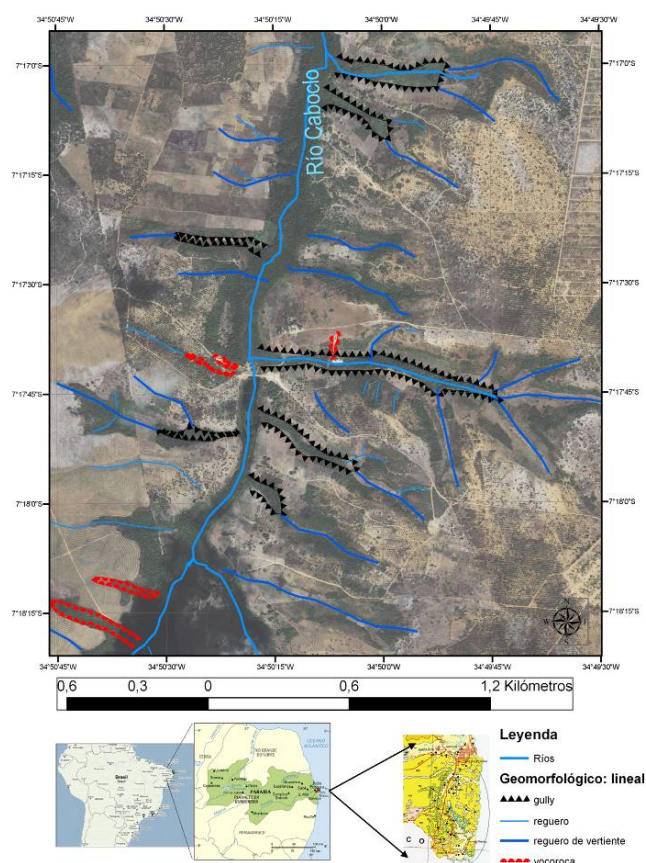


Figura 2. Mapa geomorfológico en el que se basa el mapa de riesgos.

Los regueros se sitúan en las vertientes colectoras de menor orden y tributarias de vertientes que terminan en regueros que evacúan la arroyada de toda una vertiente y que en casos de deforestación pueden evolucionar a *voçoroca* mientras que los regueros en cabecera de *voçoroca* son zonas con peligrosidad por avance de *voçoroca* si el terreno se encuentra desprovisto de vegetación.

Las voçorocas por su parte fueron cartografiadas mediante fotointerpretación. Las áreas de cabecera de drenaje desmatadas a partir de la década de 1970 y que en la actualidad se encuentran recolonizadas por la vegetación se caracterizan por la presencia de voçorocas, así mismo en cabeceras no recolonizadas encontramos voçorocas que drenan el flujo subsuperficial. Se realizaron trabajos de campo para comprobar la presencia de voçorocas en estas vertientes.

Las voçorocas son una morfología de erosión lineal producida por la conjunción de diversos mecanismos genéticos. Se caracterizan principalmente por el desarrollo de flujos subsuperficiales que dan lugar a procesos de *piping*, *sifonamiento* y sufusión) en un depósito o formación sedimentaria de baja coherencia (arenosa/areno-limosa) y sin cubierta vegetal, que se sitúa sobre otra con menor capacidad de retención (arcillas).



Figura 3. Voçoroca (Antunes Suertegaray, 2008)

Este proceso es responsable de la formación de surcos y regueros que son los elementos morfológicos evolutivos superficiales que anteceden a la aparición de colapsos rápidos y con ello el desarrollo de morfologías de tipo voçorocas. El fondo de las voçorocas es plano, puede canalizar el nivel freático aflorado en época de lluvias y evacuan el flujo subsuperficial que pasa a formar parte de la red hídrica superficial

Tras la digitalización de las caberas de drenaje y las voçorocas, se convirtió a formato raster cada archivo vectorial lineal y mediante el módulo *combine* que superpone las áreas con peligrosidad con las áreas susceptibles ante los procesos de erosión lineal (las cultivadas en este caso y las zonas con diferentes pendientes) obtuvimos las áreas con riesgo ante procesos de formación de voçorocas, de avance de voçorocas y de formación de surcos para el caso de los regueros menores en las vertientes menores y más altas topográficamente.

#### 4. RESULTADOS

Se han elaborado por tanto tres cartografías de riesgos: por avance de voçoroca, por formación de voçorocas y por formación de regueros. La primera se corresponde con aquellas áreas sin vegetación que se encuentran a los lados o a las cabeceras de las voçorocas. Las áreas de riesgo por formación de voçorocas se corresponden con los regueros que evacuan las arroyadas de las vertientes principales. Por último, los regueros se forman en las cabeceras de las vertientes de menor orden y mayor altura topográfica (Ver figuras 4, 5 y 6). Representamos una pequeña área a detalle de la zona de estudio para percibir la distribución espacial de las diferentes tipologías de riesgo.

Por último, la cartografía general de la zona de estudio desarrollada se compone de un mapa general de riesgos por procesos de erosión lineal que engloba los tres subtipos citados y un mapa de ordenación del territorio que sigue los principios del método ecodinámico (Díaz del Olmo, F. Cámara Artigas, R, 2004) basado en la gestión sostenible de los recursos naturales y en las áreas que presentan riesgos ante estos procesos. (Figuras 7 y 8).

Las áreas núcleo o de protección integral son ámbitos de excepcionalidad y singularidad ambiental, de importancia para la sostenibilidad ambiental del territorio, (procesos geológicos, integridad de los ecosistemas, biodiversidad y geodiversidad). En nuestro caso se corresponde con las zonas de mata atlántica, de manglar y de cerrado. Las áreas de restauración son ámbitos transformados por la actividad antrópica que recuperados

pueden servir para fomentar la conectividad entre ecosistemas de mayor envergadura geográfica. En nuestro caso las áreas de cabecera de drenaje que ha sido deforestadas y que por tanto presentan riesgo ante los procesos de erosión lineal. Por último, las zonas de aprovechamientos sostenibles son aquellas que presentan una mayor intensidad productiva del territorio, en nuestro caso las zonas cultivadas que no presentan riesgo ante los procesos de erosión lineal.

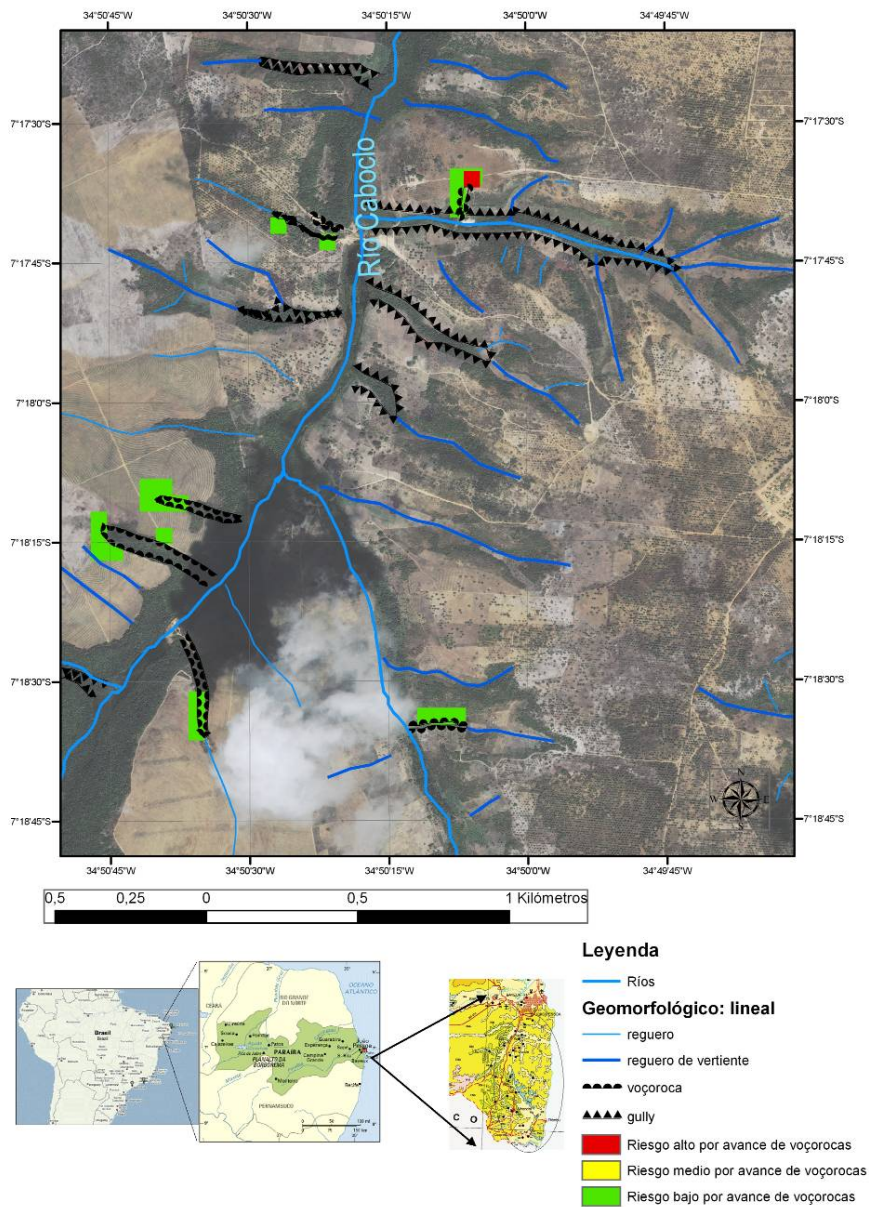


Figura 4. Riesgos por avance de voçoroca.

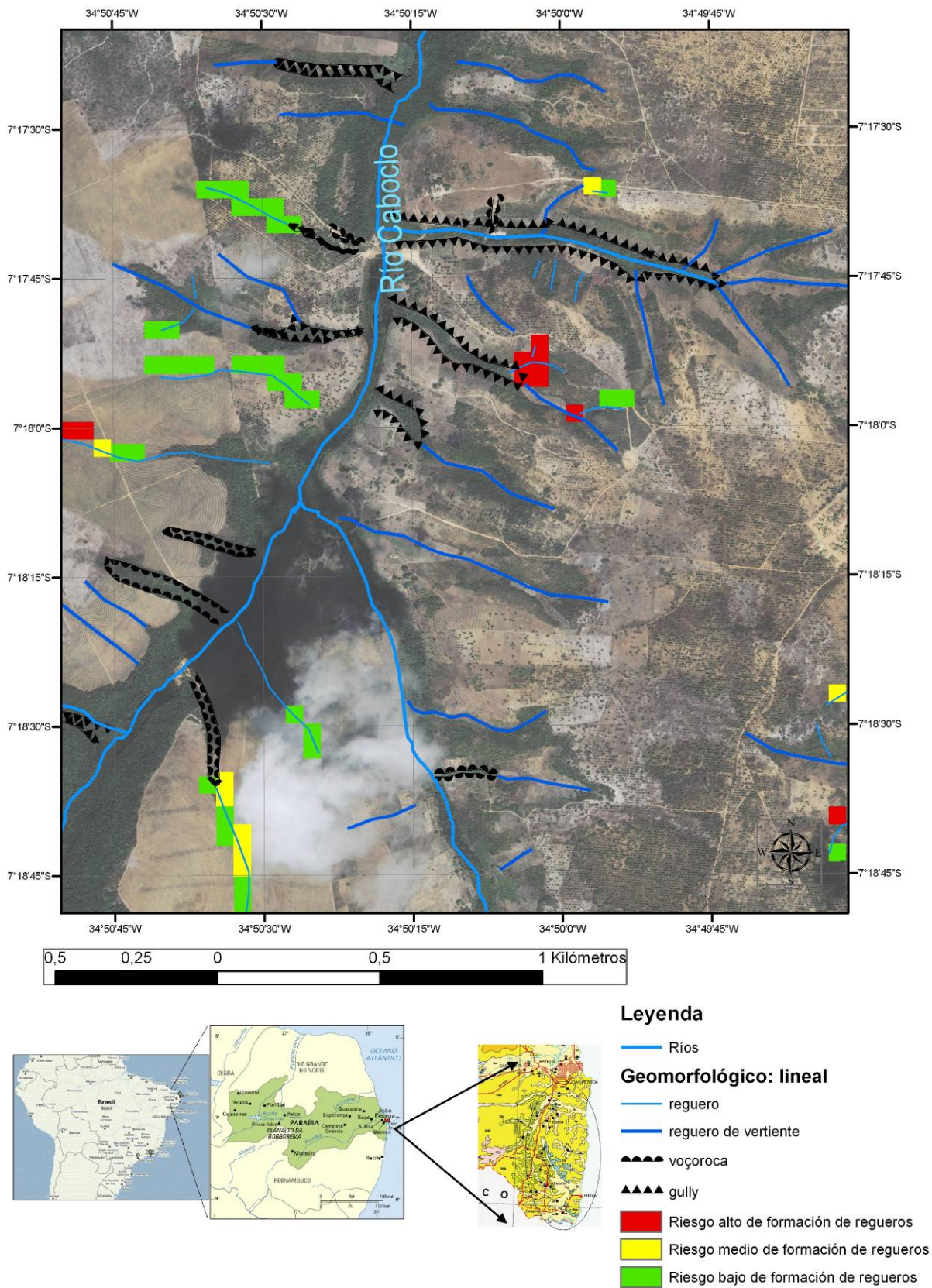


Figura 5. Riesgo por formación de regueros.

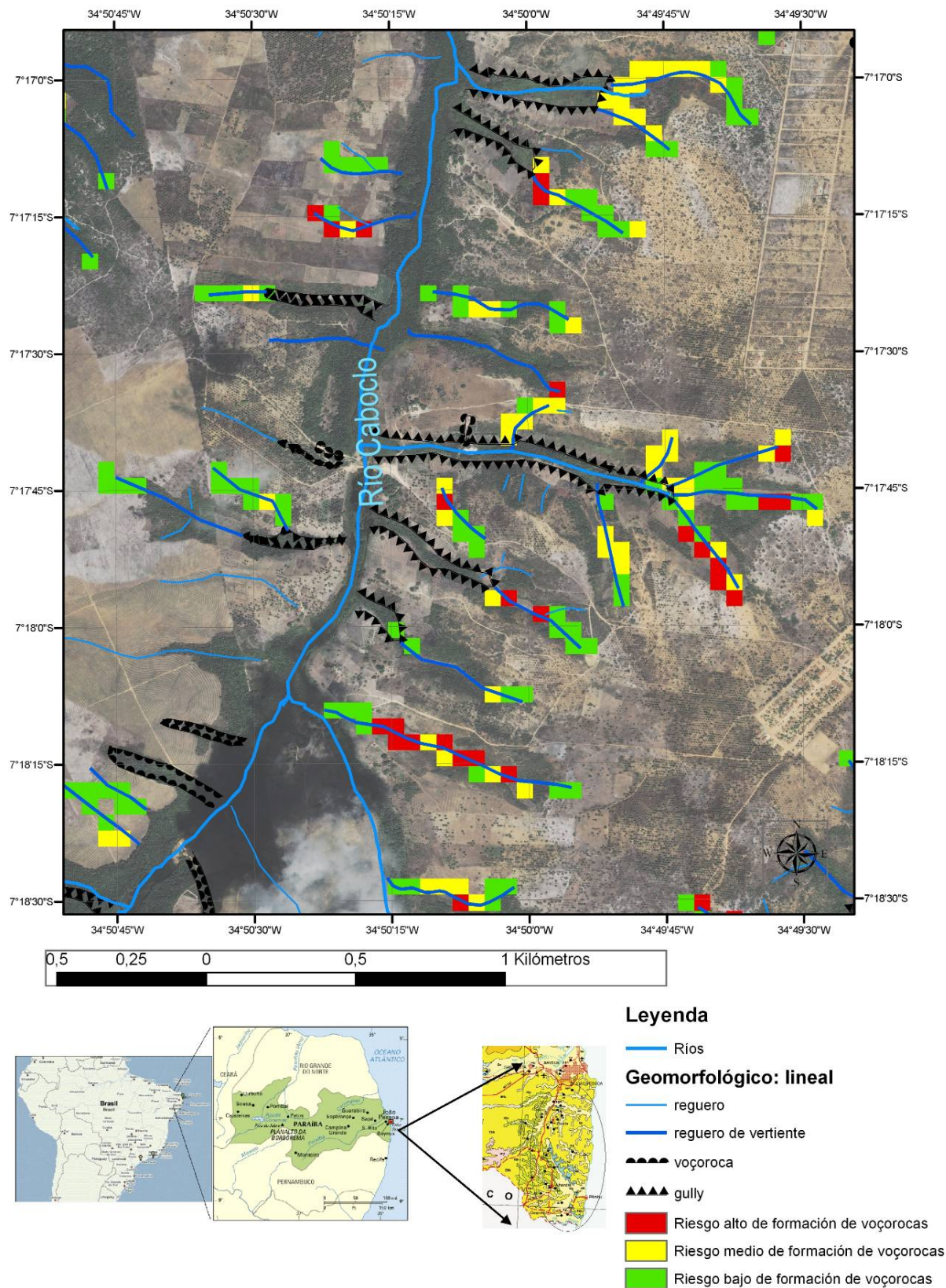


Figura 6. Riesgo por formación de voçorocas.



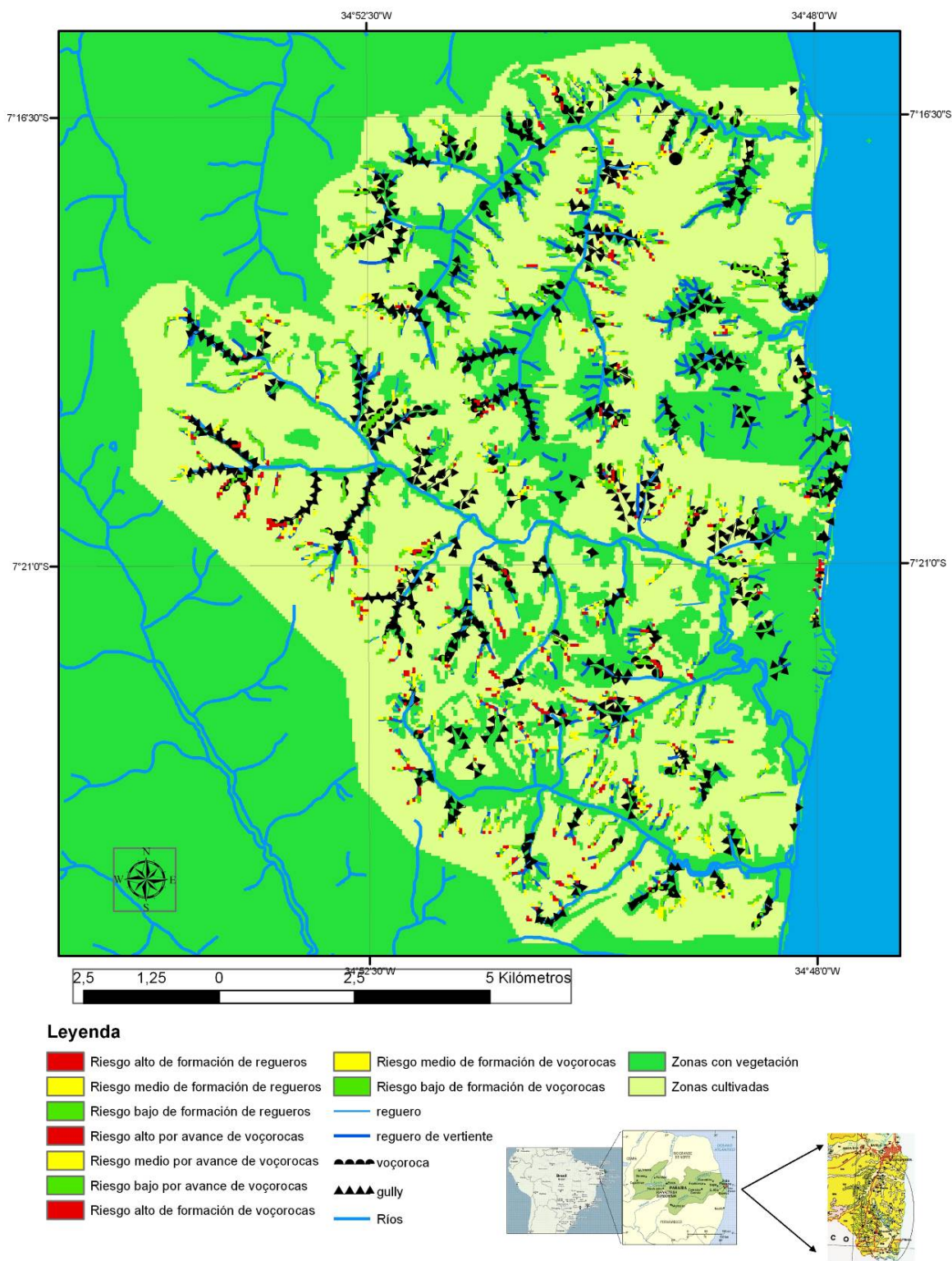


Figura 7. Áreas que presentan riesgos por procesos de erosión lineal.

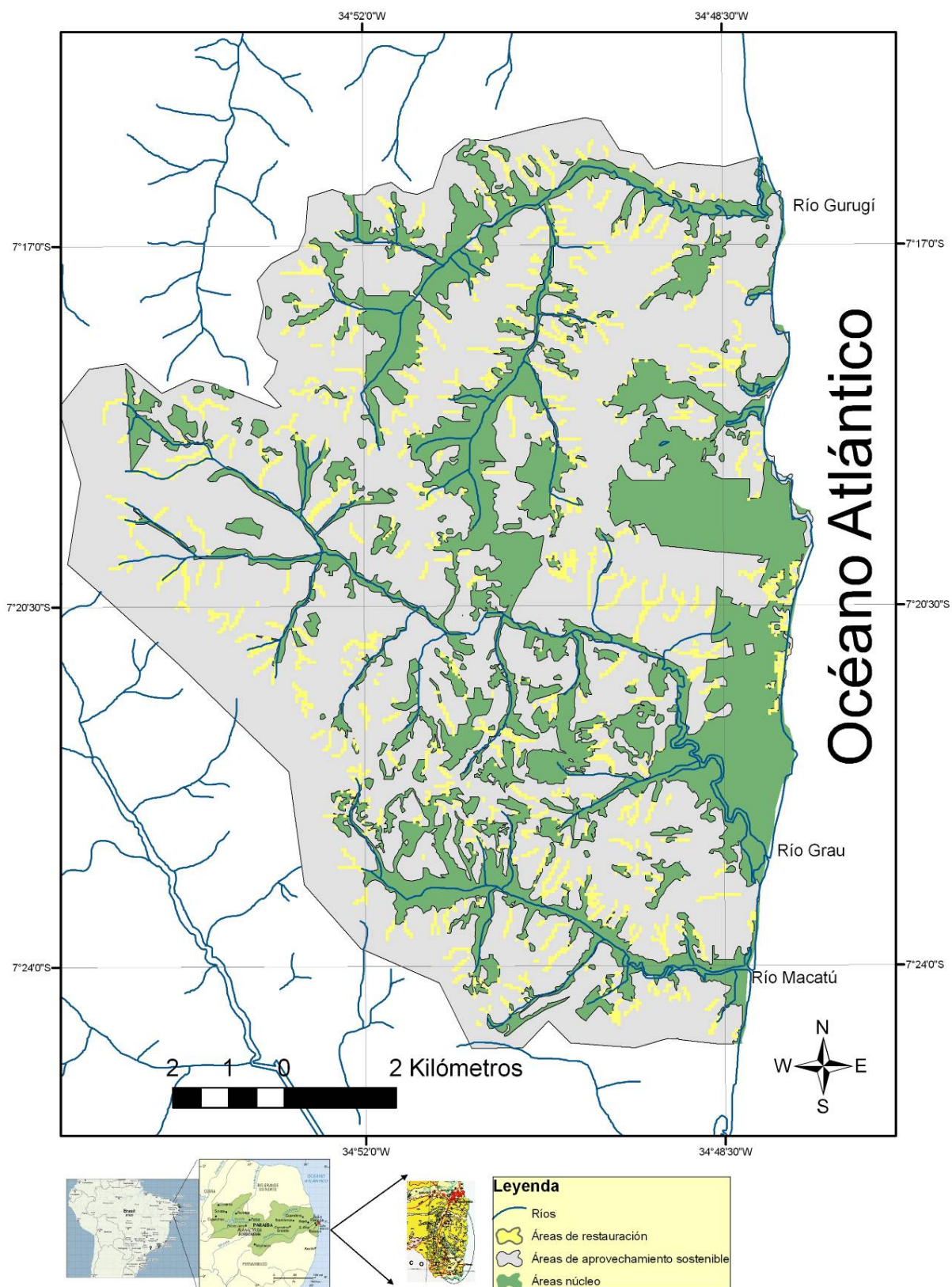


Figura 8. Propuesta de zonificación del área de estudio.

## 5. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Uno de los problemas presentados a la hora de realizar la cartografía de riesgos fue la imposibilidad de disponer de mapas de uso del suelo más detallados. La escasa resolución de la imagen satélite y la escasez general de cartografía histórica y actual del área de estudio impide realizar una cartografía temática de cultivos o de tipos de vegetación que nos den una idea más aproximada del grado de protección que diferentes cultivos o diferentes tipos de vegetación pueden presentar ante los procesos de erosión lineal.

Por ejemplo: el cultivo de piña es muy denso mientras que el de coco es muy disperso, por lo que el primero protege más el suelo. En cuanto a la vegetación, el campo *limpo* que es un pastizal con escasos arbustos, protegerá menos el suelo que una mata o un cerrado.

Por otra parte, la cartografía de riesgos basada en la digitalización de diferentes tipos de regueros según su posición topográfica y su conversión a raster es más real que la cartografía vectorial realizada previamente, ya que aparte de deformar las pendientes al simplificarlas, no tiene en cuenta las diferentes morfologías que se desarrollan en cada parte de la vertiente. Ya que cabe destacar que las vertientes han de ser gestionadas de forma íntegra si queremos evitar los procesos de erosión lineal.

La erosión del suelo es más efectiva donde el agua precipitada no puede ser infiltrada, el agua realiza una trayectoria relativamente rápida y es capaz de cargar materiales del suelo por medio de la fuerza hidráulica de su flujo. Como el agua puede fluir en grandes cantidades sobre la superficie y ejercer fuerzas hidráulicas también importantes, la erosión puede ser muy importante, inclusive sobre pendientes moderadas. (Guerra, 1999). La figura 48 reproduce algunas de las situaciones que envuelven esta temática.

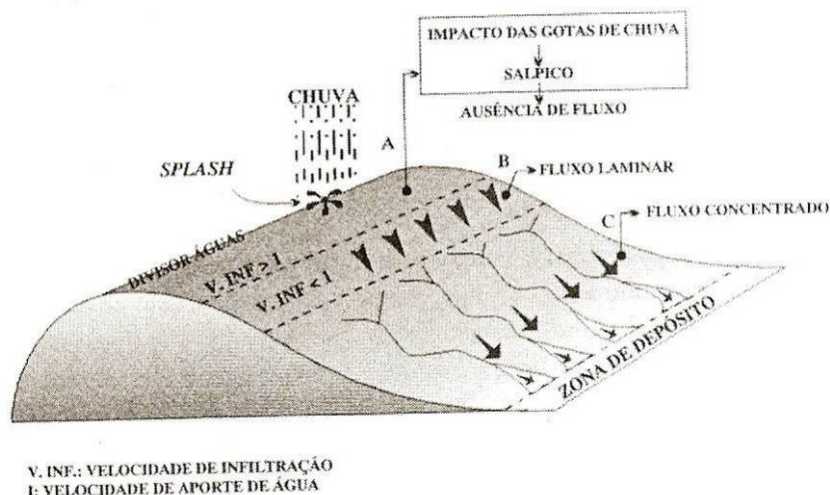


Figura 9. Organización de la erosión lineal sobre una vertiente. (Guerra, 1999).

En la parte próxima a la divisoria de aguas (segmento A), las partículas del suelo son afectadas por el impacto de las gotas de lluvia y el desplazamiento de material se restringe al derivado del efecto *splash* o erosión por salpicamiento. Horton (1945) en Guerra (1999) identifica esta sección de la vertiente como un sector sin erosión o con ausencia de flujos. En el segmento B de la vertiente, la intensidad de la lluvia supera la velocidad de infiltración, produciendo un flujo excedente, el cual se desplaza como flujo laminar o en manto. Al aumentar la cantidad de agua y las irregularidades del terreno (segmento C de la vertiente), el flujo se concentra, al principio dando lugar a canales estrechos y poco profundos que evolucionarán para canales más profundos vertiente abajo. El segmento de base de la vertiente se constituye como zona de depósito al haber una ruptura de gradiente, los flujos pierden velocidad y con ello capacidad de transporte. (Guerra, 1999).

Por todo ello para evitar los efectos de la erosión lineal se ha de intervenir en todo el conjunto de la vertiente, respetando los parches de cerrado y mata atlántica aun existentes en las zonas de cabecera de drenaje y estableciendo áreas de restauración en aquellas que estén desforestadas.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

Antunes Suertegaray, Dirce María (2008): *Feições ilustradas* – 3.ed. – Porto Alegre: Editora da UFRGS.

Cámara Artigas, R., Díaz del Olmo, F., (2004): *Directrices de gestión para la conservación y desarrollo integral de un humedal centroamericano: Golfo de Montijo* (litoral del Pacífico, Panamá). ANAM-AECl. Panamá.

Carvalho, María Gelza R.F (1982): *De “Estado da Paraíba”; classificação de geomorfológica*. Joao Pessoa, Editora Universitária/UFPB.

Furrier, M. Erasto de Araujo, M. Figueiredo de Meneses, L. (2006): Geomorfología e Tectónica da Formação Barreiras no Estado da Paraíba. *Revista do Instituto de Geociências – USP Geol. USP Sér. Cient., Sao Paulo, v. 6, n2. pp.61-70.*

Guerra, T.A.J. (1999): *Erosao e conservação dos solos*. Ed. Bertrand. R. Janeiro, Brasil.

SUDEMA. (2004): *Atualização do diagnóstico forestal do Estado da Paraíba-Joao Pessoa*.