

Estévez Cruz, Elmidio; Cueto Gil, Carlos Javier; Tellez Ramírez, Ahmed Armando
Selección de áreas potenciales para áridos en paleocauces de la Llanura Sur, Pinar del Río, Cuba

Minería y Geología, vol. 26, núm. 1, enero-marzo, 2010, pp. 13-44

Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa 'Dr Antonio Nuñez Jiménez'
Holguín, Cuba

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223514966002>

Selección de áreas potenciales para áridos en paleocauces de la Llanura Sur, Pinar del Río, Cuba

Elmidio Estévez Cruz

Carlos Javier Cueto Gil

Ahmed Armando Tellez Ramírez

Resumen

El objetivo fue revelar, a escala regional, áreas con alto potencial mineral para contener depósitos de arena y grava, asociados a la red fluvial. Se investigó la Llanura Sur de Pinar del Río, excluyendo la parte suroccidental. En el pronóstico se emplearon diferentes tipos de mapas de evidencias que representan los criterios derivados del modelo descriptivo para este tipo de yacimiento, así como el conocimiento de los procesos geológicos que lo originan. Para la integración de los mapas en un Sistema de Información Geográfica se emplearon los modelos de lógica booleana y la superposición indexada. Los pesos de los atributos se estimaron a partir del conocimiento geológico existente sobre los yacimientos de este tipo. La metodología de integración utilizada demostró el alto potencial de la llanura para contener depósitos de arena para la construcción, revelando 24 sectores perspectivos la mayoría de los cuales se localizan a menos de 15 km de los principales pueblos y ciudades. El estudio detallado de la red fluvial permitió dividir la llanura en 6 zonas con patrones de drenaje subhomogéneos y distintos niveles de favorabilidad. Dentro de la llanura, el sector más perspectivo lo constituye una franja alargada y estrecha con rumbo NE-SW que ocupa la parte central de la misma, por debajo de la premontaña. Finalmente, se demostró la utilidad de la espectrometría gamma (canal del potasio) para estudios de pronóstico regional de yacimientos aluviales de grava y arena.

Palabras clave

Cartografía, depósitos aluviales, espectrometría gamma, grava y arena, lógica booleana, potencial mineral, SIG, superposición indexada.

Selection of potential areas containing aggregates in the paleochannels of the southern plain of Pinar del Rio, Cuba

Abstract

The objective of this research was to identify the areas of high mineral potential within the region with gravel and sand deposits associated to the fluvial system. The investigation was conducted in the southern plain of Pinar del Río, excluding the southern-western portion. Various types of evidence maps representing the criteria produced by the descriptive models for this type of ore body were used in the forecast as well as data of the geological processes that originate them. Boolean logic models and indexed overlay were used in order to integrate the maps in GIS (Geographic System Information) platform. The weight of the attributes was estimated based on the available geological data about ore bodies of this kind. The integration methodology used indicated that the plain had high potential of having deposits of sand to be used for construction purposes, revealing 24 potential sectors; the majority is no farther than 15 kms from the main towns and cities. A detailed study on the fluvial system allowed dividing the plain into 6 areas with sub-homogenous drainage patterns and different favorability levels. The most potential sector within the plain is an elongated and narrow strip of land to the NE-SW; which takes up the central portion of the plain, below the pre-mountain. Lastly, the gamma-ray spectrometry (potassium channel) is proven to be useful in regional studies for identifying potential alluvial ore bodies of sand and gravel.

Key words

Mapping, alluvial deposits, gamma-ray spectrometry, gravel and sand Boolean logics, mineral potential, GIS, Index overlay.

INTRODUCCIÓN

Los áridos o agregados naturales (arena, grava y piedra triturada) constituyen los recursos minerales más usados a escala global y la materia prima mineral no combustible más valiosas en el mundo (Lawrence *et al.* 2002, Richards & Peel 2003). Ellos proporcionan el fundamento material de la sociedad moderna y son extraídos en grandes volúmenes para la construcción de edificios, carreteras y otras infraestructuras esenciales para el desarrollo de cualquier país. Como el valor unitario es tan bajo, los costos de transportación son determinantes por lo que los depósitos necesariamente tienen que localizarse cerca del mercado potencial (ciudades, pueblos o vías de comunicación de bajo costo).

Desde la década de los 80 del siglo pasado, en la provincia de Pinar del Río ha sido escasa la disponibilidad de arena y grava para la construcción (Rego *et al.* 1984, Martínez 1987). Esta situación se ha acrecentado en los últimos años debido al deterioro del fondo habitacional, los daños causados a la infraestructura por el paso de los ciclones tropicales y el crecimiento sostenido de la demanda de estos recursos.

La poca disponibilidad de grava y arena para la construcción no es solamente una problemática cubana, en la actualidad existe una preocupación universal por el agotamiento de estos recursos. Un número creciente de regiones en América del Norte y otras partes del mundo experimenta una crisis de agregados, las reservas existentes están siendo agotadas o esterilizadas, producto a la rápida expansión urbana que impide otros posibles usos del suelo (Chaisen *et al.* 2002, Richards & Peel 2003).

Históricamente la provincia de Pinar del Río se ha abastecido de la explotación de los yacimientos de génesis aluvial marina, localizados en las formaciones Guane y Guevara, lo que ha incentivado un número significativo de investigaciones geológicas

Sabana Párraga, La Tea) se han agotado y los nuevos depósitos encontrados de este tipo se localizan en la Llanura Sur occidental, fuera del área de estudio (Figura 1) y muy alejados de la capital provincial y de los municipios de la parte suroriental de la provincia.

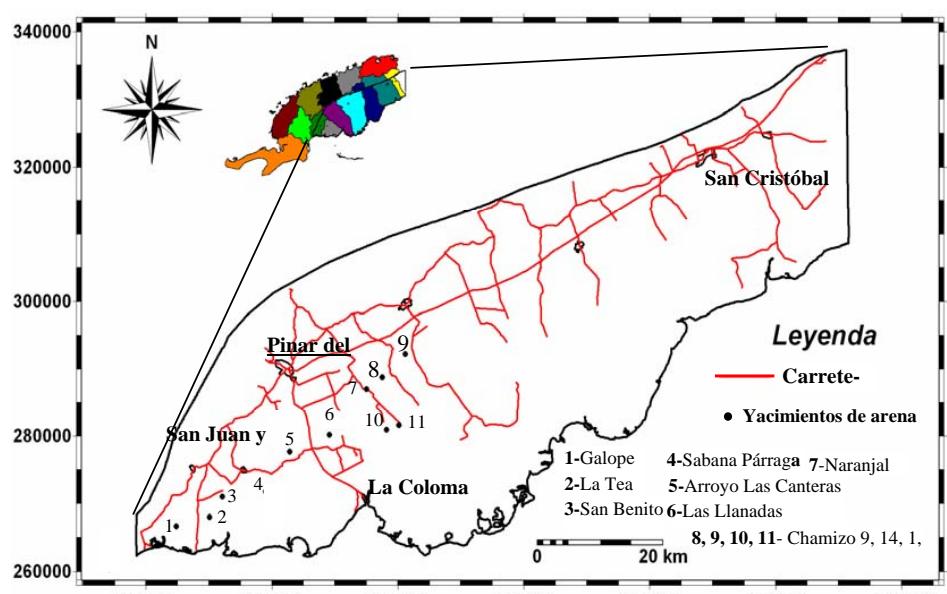


Figura 1. Mapa de ubicación del área de estudio

Como consecuencia de esta situación las investigaciones geológicas se han dirigido a las arenas y gravas fluviales, como fuente alternativa de agregados. Los yacimientos aluviales siempre se consideraron de perspectivas limitadas al ser los ríos de la provincia de escaso caudal y cursos cortos y fluir fundamentalmente en dirección N-S o NO-SE (Figura 2), por lo que su empleo se ha recomendado para dar solución a necesidades locales y sin exigencia de calidad normativa para los materiales (Klen *et al.* 1968, Coutin *et al.* 1980).

Sin embargo, desde la década del 50 del siglo pasado se han extraído importantes volúmenes de estos recursos como lo evidencian las excavaciones abandonadas en los cursos de los ríos que drenan la llanura. Las nuevas condiciones económicas

provocan un cambio radical en este enfoque. La mayor atención se ha concentrado en los depósitos asociados a los cauces abandonados (paleocauces), pues los activos poseen recursos más limitados y su explotación provoca mayores afectaciones al medio ambiente (Denis & Sobrino 2006, Mederos 2007).

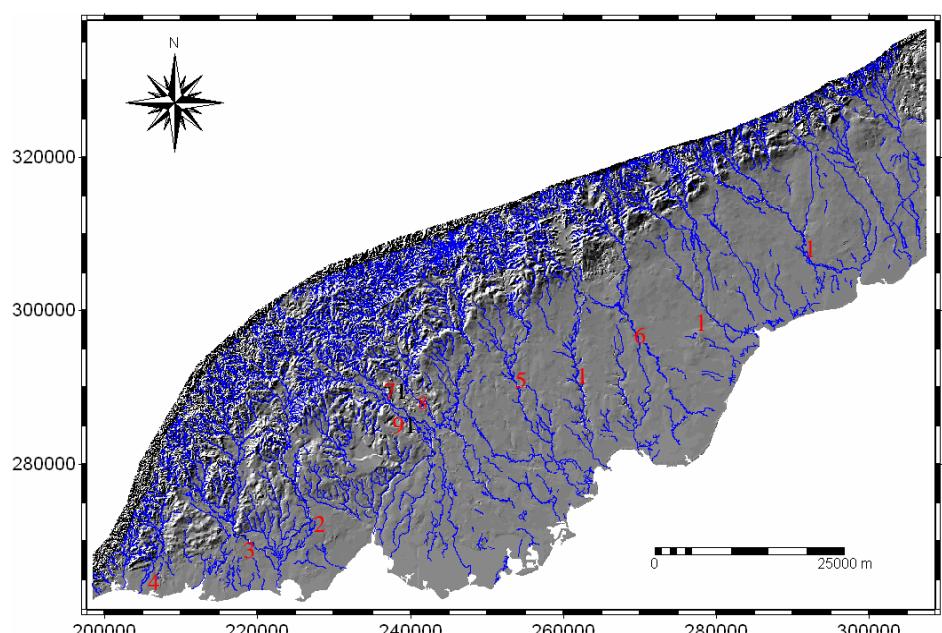


Figura 2. Red de drenaje de la Llanura Sur sobre el modelo de relieve sombreado. 1- río San Diego de los Baños, 2- río Guamá, 3- río Feo 4- río San Juan, 5- río Herradura, 6- río Los Palacios. 7- río Ajiconal, 8- Hondo, 9 - Paso Viejo, 10 - río San Cristóbal 11- río Bacunagua.

En la provincia se han llevado a cabo varios trabajos referidos a la búsqueda de áridos para la construcción en cauces fluviales (Klen *et al.* 1968, Gallardo 1978, Navea *et al.* 1990). En todos los casos, la metodología utilizada en la selección de las áreas favorables fue muy similar y constó de los siguientes pasos: estudio de los materiales y datos anteriores, recorridos y reconocimientos orientativos (itinerarios geológicos) en el terreno para la identificación litológica de los sedimentos y el estudio del ancho, potencia y composición petrográfica de los depósitos fluviales;

La primera referencia a la búsqueda de arena en paleocauces, la realizó Moreno (1987), quien valora las potencialidades de los ríos Hondo y Paso Viejo para contener depósitos de este tipo, especialmente en la franja sur fuera de la zona de piemonte. Por otra parte, Mederos (2007) sobre la base de las extracciones locales realizadas por pobladores y entidades estatales en los cursos de los ríos Hondo y San Diego (Figura 2) indica que en los paleocauces de la red hidrográfica de la Llanura Sur se podían encontrar acumulaciones importantes de arena de construcción.

Mederos (2007) y Mederos *et al.* (2009) obtienen importantes resultados sobre el pronóstico de áreas favorables para la ocurrencia de yacimientos de arena en paleocauces utilizando una metodología diferente a la tradicionalmente empleada en otras regiones del país, basada en el estudio de la red de drenaje y la interpretación de las fotos aéreas. El mismo autor propone un modelo geológico descriptivo para ese tipo de yacimiento, en el cual se apoya la presente investigación. El trabajo de los referidos autores abarca solamente la zona centro oriental de la Llanura Sur, específicamente desde la capital provincial hasta Los Palacios; no utiliza el mapa geológico del área como un criterio fundamental para el pronóstico, y el empleo de las herramientas SIG se limitó a la visualización de los resultados y no al procesamiento e integración de información geocientífica regional.

Denis *et al.* (2009) estudian detalladamente mediante el uso de fotos satelitales, itinerarios geológicos, sondeos manuales y perforaciones, las áreas perspectivas identificadas por Mederos (2007) delimitando ocho sectores con características y condiciones favorables para la ocurrencia de depósitos de arena en las cuencas de los ríos Hondo, San Diego y los Palacios.

En otros países, las metodologías utilizadas en la selección de áreas favorables para este tipo específico de depósitos se han desarrollado básicamente para ambientes glacio-fluviales y se fundamentan, por

Sutphin *et al.* 2002, Rickett 2005) y por otra, en la identificación en los mapas a gran escala de la geología del Cuaternario de las unidades que por su edad y ambiente deposicional son más favorables para contener estos recursos (Cox 1999, Chaisen *et al.* 2002).

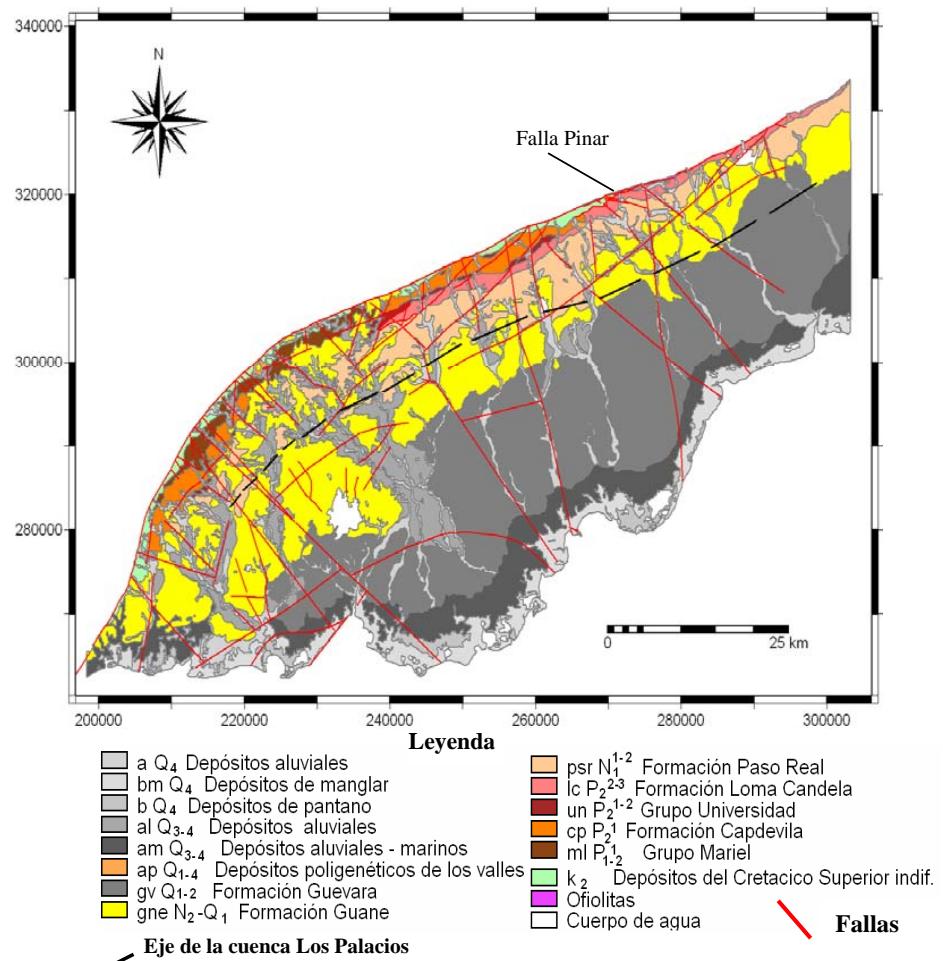
Bliss & Bolm (2007) llevan a cabo una evaluación de los recursos de grava y arena para la construcción y reparación de la infraestructura, a lo largo de los ríos y en abanicos fluviales en Afganistán. Como áreas favorables para grava y arena fluvial, dentro de cada cuenca hidrográfica, estos autores consideraron los sectores con pendientes inferiores a 10 grados.

La presente investigación está dirigida a revelar áreas con alto potencial mineral para contener depósitos de arena y grava, asociados a la red fluvial, específicamente en cauces abandonados o paleocauces, a partir de un pronóstico automatizado en plataforma SIG. Parte de los criterios expuestos por Mederos *et al.* (2009) sustentándolos con el empleo de nuevos métodos y datos geocientíficos regionales, como son: modelos de integración de lógica booleana y superposición indexada, mapa geológico 1: 100 000, mapa de suelo 1:25 000 y el uso de la aeroespectrometría gamma (canal del potasio). El área de estudio coincide con la extensa llanura que se ubica al sur de la falla Pinar, excluyendo la parte sur occidental (Llanura La Fe-Cortés) y se extiende desde el extremo oriental de la provincia de Pinar del Río hasta el municipio de San Juan y Martínez (Figura1).

Geología del área

Desde el punto de vista geológico, en la provincia de Pinar del Río afloran secuencias mesozoicas del margen continental pasivo de América del Norte (zona Guaniguanico). Por el nordeste, estas secuencias son cubiertas tectónicamente por ofiolitas y rocas del arco volcánico cretácico (Zona Bahía Honda), mientras que por el sur son cortadas por la falla Pinar, que las separa de la cuenca de Los Palacios (zona San Diego de los Baños), rellena con depósitos del Neógeno-Cuaternario en buena medida provenientes de la erosión de

El área de estudio se localiza en la cuenca Los Palacios y abarca la Llanura Sur de Pinar del Río. La región es de relieve llano, no presenta gran complejidad geológica y está bañada por diversas corrientes fluviales en cuyos valles se han acumulados depósitos arenos-arcillosos. La edad de las rocas que afloran va desde el Paleógeno hasta el Cuaternario (Figura 3). Entre las principales formaciones descritas en el área se encuentran: Formación Paso Real (Oligoceno Superior-Mioceno Superior basal), Formación Guane (Plioceno Superior-Pleistoceno Inferior), Formación Guevara (Pleistoceno Inferior Medio) y depósitos del Cuaternario actual (Q_{IV}) (Barrios *et al.* 1988).



MATERIALES Y MÉTODOS

Con el objetivo de modelar el potencial del área de estudio para hospedar depósitos fluviales de arena y grava se propone una metodología que incluye la selección del modelo geológico descriptivo, el procesamiento de los mapas de evidencias y la obtención del mapa de potencial a partir de la integración de los mapas anteriores. Finalmente, la cartografía del potencial se complementa con el análisis de la red de drenaje con vistas a restringir las áreas favorables sobre la base de considerar otros criterios que no se tuvieron en cuenta durante el proceso de integración (Figura 4).

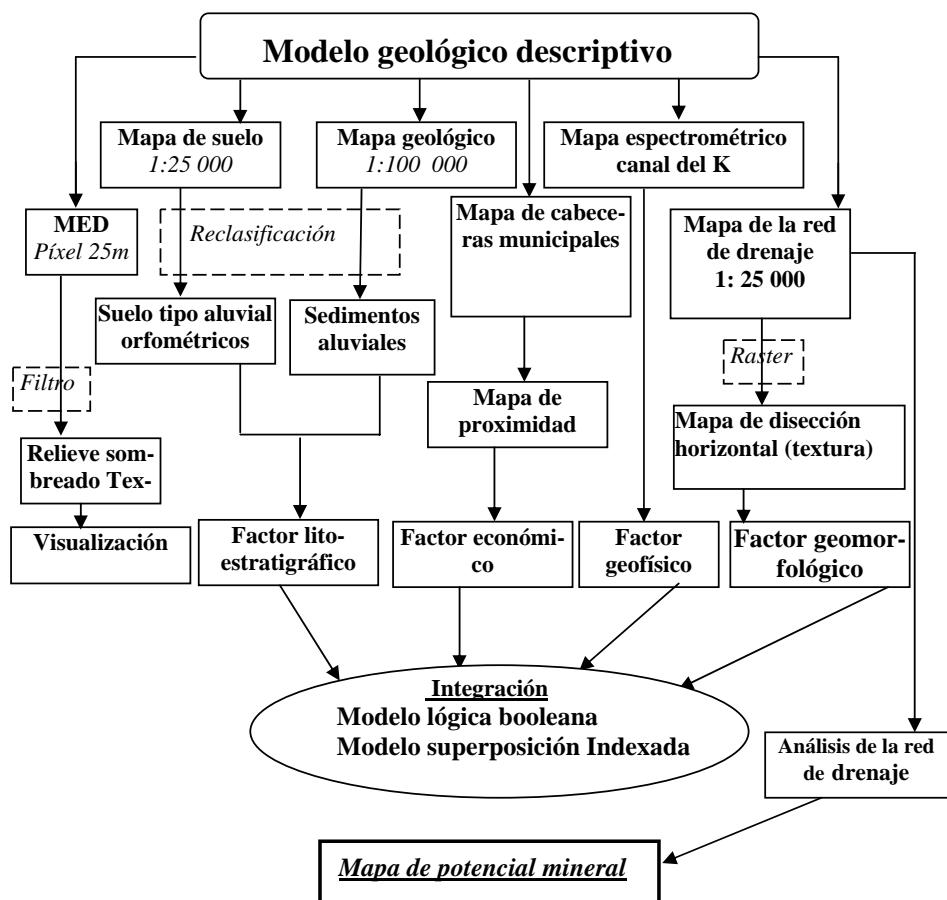


Figura 4. Diagrama de flujo de la metodología empleada.

Modelo geológico y procesamiento de los mapas de evidencias

Los modelos de yacimientos minerales son herramientas para determinar la probabilidad de que depósitos con cierto volumen, área y otras características existan en una región dada. Ellos se definen como un conjunto sistemático de información que describe los atributos esenciales o propiedades de una clase de yacimientos minerales (Singer y Berger 2007, Bliss *et al.* 2009). En la cartografía del potencial mineral con empleo de tecnología SIG, los modelos descriptivos de yacimientos minerales juegan un papel fundamental en la selección y derivación de los mapas predictores del tipo de yacimiento buscado y en la asignación de los pesos a los mapas escogidos (Bonham-Carter 1994).

Los depósitos de grava y arena se forman por variados procesos geológicos. Los glaciares, ríos, arroyos y los procesos marinos han contribuido a la formación de los recursos que se emplean como agregados, por consiguiente, la clave para a localizar los depósitos adecuados y evaluar el potencial mineral para esta materia prima en determinadas áreas o regiones está en la comprensión de los procesos que le dieron origen y del ambiente geológico en los cuales estos materiales se encuentran (Knepper *et al.* 1994).

Como prerequisito para la concentración de los granos minerales es necesario que estos resistan los procesos de intemperismo, erosión y transporte. Solamente aquellos minerales que entran a los sistemas fluviales en cantidades apreciables tienen posibilidades de formar yacimientos de importancia económica. Las condiciones ideales para la formación de yacimientos de este tipo se dan cuando existe un alto grado de conectividad entre la fuente y las áreas de deposición (Carling & Breakspear 2006).

En los sistemas fluviales, la grava y la arena se asocian a los cauces activos, llanuras de inundación (dentro de los cauces abandonados o paleocauces) y terrazas fluviales (antiguas llanuras de inundación). En los recodos de los ríos, las corrientes van más rápidas en la parte

depositarse en la parte interna, donde la velocidad de la corriente es menor, produciendo un depósito de grava y arena conocida como barra de meandro (*point bar*). El efecto de estas barras en los meandros es que la curvatura tiende a ser cada vez más pronunciada, hasta que el cauce se rectifica por el estrangulamiento del meandro. El desarrollo de nuevos meandros hará que el río migre de un lado a otro de la llanura de inundación.

Los canales abandonados (paleocauces) se rellenan de limos y arcillas que se disponen en forma de láminas, las sucesivas posiciones de los canales activos están marcadas por la acumulación en barras de meandro de arenas y gravas depositadas en el interior de las curvas. La extensión de las capas de grava y arena depende de cuánto migre el meandro antes que el canal lo abandone. Los sedimentos depositados por un río meandriforme consisten fundamentalmente de material muy fino (limo y arcilla), la mayor parte del cual se deposita en la llanura de inundación. Sin embargo, entre estos depósitos hay lentejones o capas de grava que prueban la existencia de canales que migran.

Mederos *et al.* (2009), establecen un modelo geológico descriptivo para los depósitos de grava y arena en cauces abandonados en la Llanura Sur de Pinar del Río, el cual contiene todos los elementos del esquema propuesto por Cox y Singer (1986). A partir de ese modelo y del conocimiento de la dinámica de las corrientes fluviales, se identifican 3 criterios fundamentales que pueden ser usados en plataforma SIG para el pronóstico regional de este tipo de depósito.

1. Los yacimientos de grava y arena están asociados a los sedimentos aluviales del cuaternario que forman las llanuras de inundación, terrazas, cauces activos y abandonados de los ríos que atraviesan la región de estudio.
2. Estos depósitos se forman en zonas donde predominan los

depositacionales que contribuyen al amplio desarrollo de la llanura de inundación.

Los depósitos aluviales se forman a partir de la erosión de las formaciones terrígenas (Formaciones San Cayetano, Manacas, Arroyo Cangre) que afloran en la cordillera de Guaniguanico. La principal fuente de aporte lo constituyen las areniscas cuarzo feldespáticas de grano medio fino de la formación San Cayetano.

Cada uno de estos criterios puede ser directa o indirectamente cartografiado a escala regional. El criterio litoestratigráfico se obtiene a partir de la reclasificación del mapa geológico y el de suelo.

El segundo criterio se valora indirectamente a través del mapa de disección horizontal o densidad de la red de drenaje, que se obtiene a partir de la rasterización del mapa vectorial de la red de drenaje. En aquellas áreas donde afloran sedimentos aluviales del Cuaternario y poseen alta densidad de la red de drenaje, la probabilidad de que el cauce haya migrado lateralmente es mucho mayor. Las áreas muy diseccionadas, pero que coinciden con sectores de carácter erosivo, no poseen potencial para este tipo de yacimiento.

Finalmente, los sedimentos aluviales provenientes de la erosión de las areniscas cuarzo-feldespáticas de la formación San Cayetano están enriquecidos en potasio, lo cual facilita su cartografía a partir de los datos aeroespectrométricos (canal del potasio) a escala 1: 100 000 (Sánchez-Cruz y Rodríguez, 2002). El mapa del canal del potasio se reclasificó en 3 clases de contenido empleando los valores de corte $\mu-\sigma$ y $\mu+2\sigma$.

Los datos espaciales utilizados para representar los distintos criterios regionales (mapas de evidencias) se relacionan en la Tabla 1. Sobre la base de la escala de los mapas utilizados y el

dimensiones, que se corresponde con los mapas de menor escala (mapa geológico) y menor resolución espacial (mapa espectrométrico - canal del potasio), permiten obtener un mapa final a escala 1: 100 000.

Tabla 1. Datos primarios espaciales empleados en el estudio

Mapa	Formato original	Escala	Fuente	Uso
Modelo de elevación digital	Raster Tamaño de píxel 25m		Geocuba, 2001	Relieve sombreado Visualización e Interpretación
Mapa geológico	Vectorial	1: 100 000	Instituto de Geología y Paleontología, 2005 (García-Delgado et al., 2005)	Sedimentos aluviales
Mapa de suelo	Vectorial	1: 25 000	Departamento de suelo, MINAGRI, 2002	Suelos aluviales
Mapa espectrométrico (canal del K)	Raster Tamaño de píxel 100m		Instituto de Geología y Paleontología, 2002*	Zonas de altos contenidos de K
Hojas cartográficas (digitales)	Raster	1: 25 000	Geocuba	Digitalización de la red de drenaje

*Base digital de datos unificada y estandarizada del levantamiento aeroespectrométrico (1979-1993) (Sánchez-Cruz y Rodríguez, 2002)

La preparación de los datos primarios, el álgebra de mapas y el análisis espacial se realizó usando las potencialidades del ILWIS 3.4, un SIG de código abierto desarrollado por el ITC (*Internacional Institute for Geoinformation Science and Earth Observation*), en los Países Bajos.

Integración de los mapas de evidencias

En esta etapa se combinaron todos los mapas que proporcionan evidencias sobre los yacimientos aluviales de grava y arena. Existen distintos modelos o técnicas para la integración de los mapas de evidencias y la obtención del mapa de potencial mineral (Bonham-Carter 1994, Carranza 2002, Porwal 2006, Harris *et al.* 2006). En sentido general estas herramientas pueden dividirse en dos grandes grupos: los métodos basados en los datos (modelos objetivos) y métodos basados en el conocimiento (modelos

Como los modelos sustentados en los datos necesitan contar con un número grande de yacimientos o manifestaciones y en el sector de trabajo la cantidad de patrones es reducida, para integrar los mapas predictores se emplearon dos métodos: lógica booleana y superposición indexada.

El pronóstico se realizó en 3 etapas sucesivas o modelos, de forma tal que se fue incrementando la complejidad del mismo. El mapa pronóstico se obtuvo a partir de la suma algebraica de los 3 mapas de evidencias, asignándole el mismo peso a cada uno de ellos. Otro elemento tenido en cuenta y que favorece el uso de estos métodos, es la existencia de un modelo descriptivo formalizado que permite la identificación de los factores controladores a escala regional.

La lógica booleana es, posiblemente, el modelo de integración en SIG más simple y mejor conocido. Se basa en la combinación lógica de mapas booleanos o binarios, a través de los operadores lógicos **and** (y) y **or** (o). La desventaja de este modelo radica en la asignación de igual importancia (peso) a todos los criterios que se combinan (Bonham-Carter 1994). Por otra parte la salida o mapa final es binaria y extremadamente restrictiva si se emplea el operador **and**, o demasiado optimista si se utiliza **or**. El método ha sido utilizado para estudios de favorabilidad de yacimientos metálicos (Bonham-Carter 1994, Moreira et al. 2003).

La superposición indexada constituye un método simple donde la ponderación de los mapas de evidencias y las clases, se basa en el conocimiento que posee el geólogo sobre el tipo de yacimiento estudiado. El mapa resultante (mapa de potencial mineral o favorabilidad) es una combinación lineal ponderada de todas las variables estudiadas (Bonham - Carter 1994, Harris *et al* 2001).

$$S = \frac{\sum_{i=1}^n S_{ij} W_i}{\sum_{i=1}^n W_i}$$

Donde: W_i - es el peso de cada uno de los mapas de evidencias, S_{ij} - es el peso de la clase j en el mapa de evidencias i y S - Mapa resultante

Las ventajas del método radican en que la ponderación de mapas y atributos permite una mejor representación del criterio de los expertos. Ajustando los pesos de mapas y clases es posible evaluar diferentes escenarios y el mapa resultante posee varias clases o niveles de favorabilidad, la principal desventaja está en la naturaleza lineal aditiva del método (Bonham-Carter 1994).

Análisis de la red de drenaje

Como los yacimientos de grava y arena están asociados a la red fluvial, se realizó un estudio detallado del drenaje con el objetivo de establecer, de forma preliminar, las regularidades en la localización de los yacimientos buscados, complementar el pronóstico realizado y reducir el número de áreas favorables. El análisis de la red de drenaje consistió en la individualización de subáreas homogéneas dentro de la llanura sobre la base de la dirección del flujo, el patrón de drenaje, la textura o disección horizontal y el desarrollo de los depósitos aluviales.

Los mapas predictores, que representan los factores controladores o criterios regionales derivados del modelo descriptivo, fueron integrados en un mapa pronóstico final para depósitos de arena y grava.

RESULTADOS

Mapa geológico

Los yacimientos de grava y arena están asociados a los sedimentos aluviales en los cauces, llanuras de

disponible (Figura 3) fue reclasificado a binario para identificar las áreas o sectores donde afloran los sedimentos fluviales del cuaternario (Figura 5a). Según este mapa, los sedimentos poseen el máximo desarrollo en una franja de orientación NE-SW, localizada a continuación de la premontaña en la parte central de la llanura, y a una distancia promedio de 7 km de la falla Pinar. También resulta obvio el hecho de que en la parte más occidental de la llanura los depósitos aluviales poseen mayor distribución areal.

Mapa de suelo

Este mapa, de escala mayor que el geológico, fue reclasificado a binario para revelar los tipos de suelos de origen aluvial (tipo XXVI). La distribución espacial de los mismos coincide básicamente con los sedimentos aluviales del Cuaternario (aQ_4 y aIQ_{3-4}). Sin embargo, en él se delimitan áreas no identificadas por el mapa geológico, específicamente en la parte sur del territorio. Por otra parte, no se revelan los depósitos aluviales que aparecen en la zona de la premontaña (Figura 5b).

Mapa de sedimentos aluviales

El mapa final de sedimentos aluviales (Figura 5c), que representa el factor litoestratigráfico, fue obtenido por la combinación de los dos mapas binarios anteriores (Figura 5a y 5b), utilizando el operador lógico *or*. De esta forma se logra cartografiar todos los sedimentos aluviales del área de estudio, revelados por el mapa geológico y el de suelo.

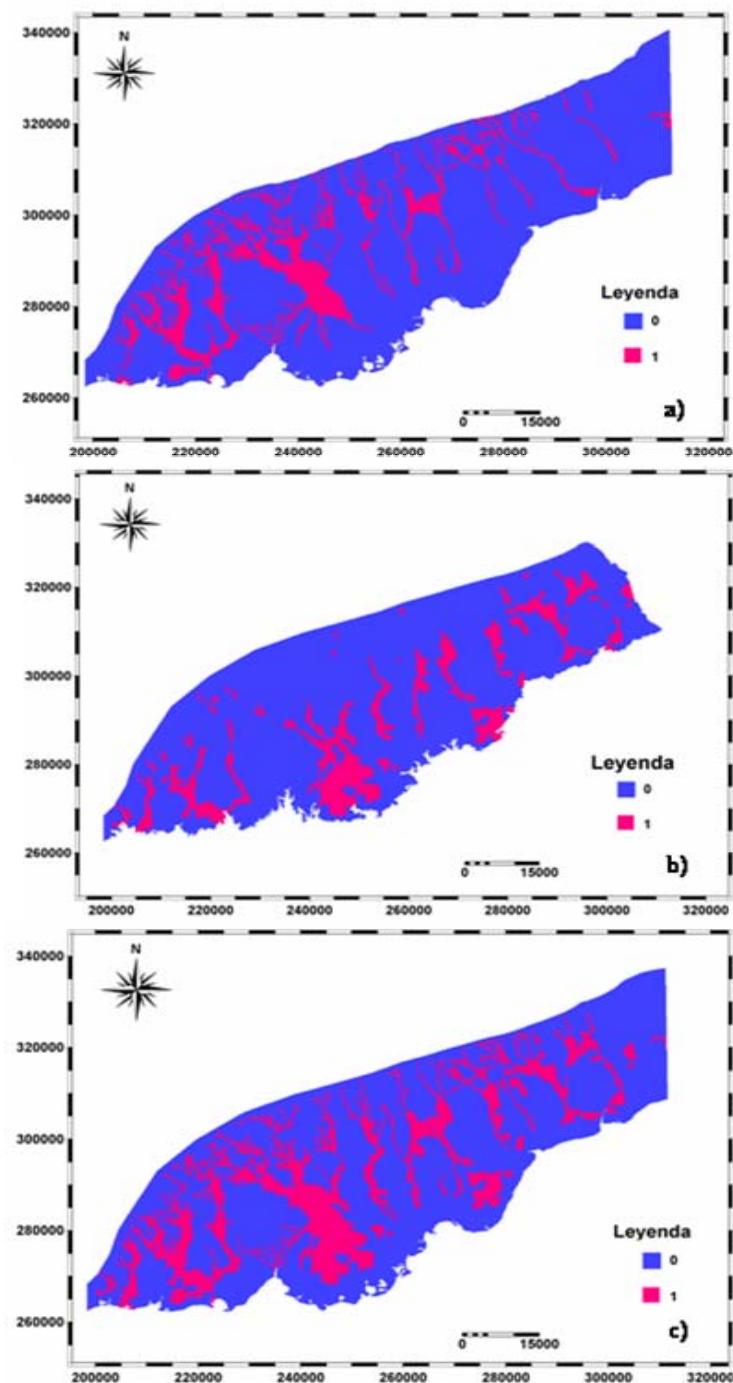


Figura 5. Mapa de sedimentos aluviales (factor litoestratigráfico) a) Mapa geológico binario b) Mapa binario de suelo c) Mapa final de

Mapa de disección horizontal

La disección horizontal o textura del drenaje se expresa cuantitativamente sobre la base de la densidad del drenaje y se estima a partir de la suma total de la longitud de los cursos fluviales por unidad de área (km^2). Este mapa representa el factor geomorfológico e identifica las áreas, en las cuales se manifiesta una alta densidad del drenaje y que corresponden con aquellos sectores donde existe un mayor número de cauces por kilómetro cuadrado o donde la sinuosidad o meandricidad de estos es considerablemente mayor. De esta forma, aquellos tramos de la red fluvial con un mayor desarrollo de la llanura de inundación, mayor probabilidad de migración lateral del cauce, y por consiguiente, mayor potencial para este tipo de yacimiento, se caracterizan por valores elevados de la disección horizontal, combinado con una amplia distribución de los sedimentos aluviales (mapa de sedimentos aluviales).

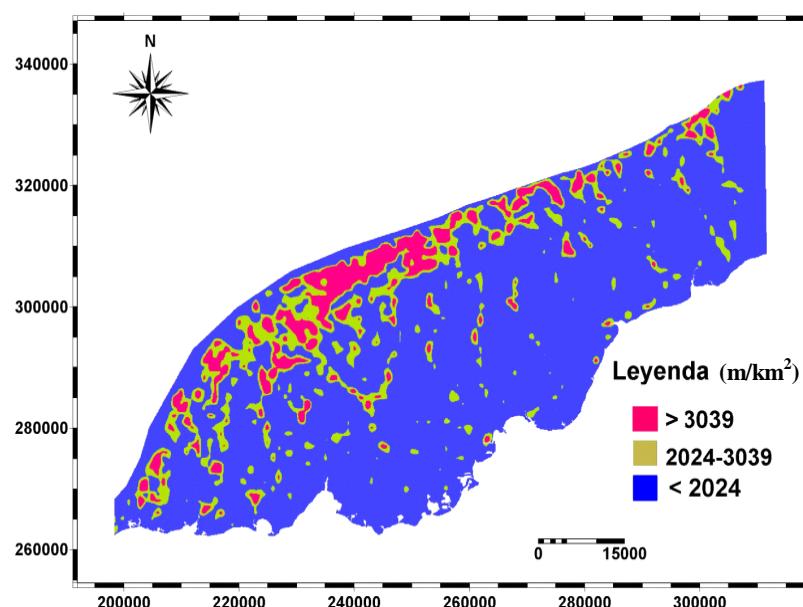
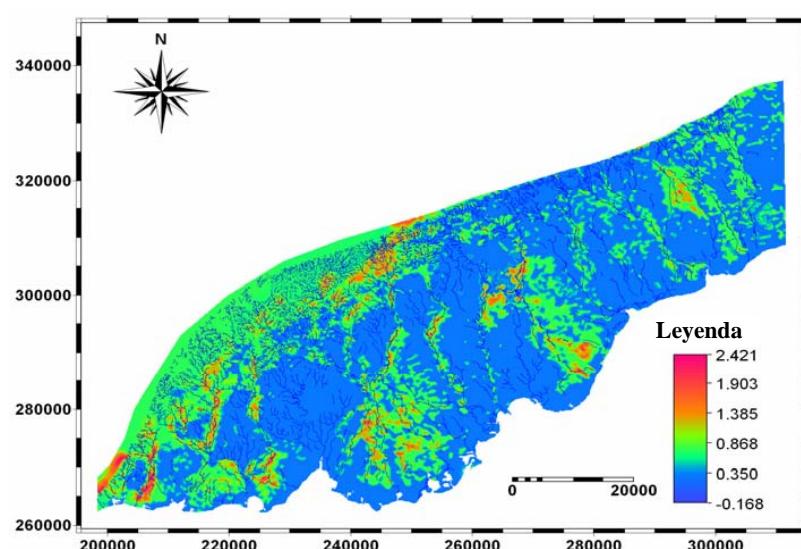


Figura 6. Mapa de disección horizontal reclasificado, elaborado a partir de la red de drenaje con tamaño de píxel 1000x1000 y rango desde 0 hasta 8067 m/km^2 .

inmediatamente al sur de la falla Pinar, se observa una franja de alta densidad del drenaje (Figuras 2 y 6), sin embargo en esa zona los aluviones poseen poco desarrollo (Figura 5) lo que evidencia que los procesos erosivos predominan sobre los acumulativos. Hacia el sur la densidad va disminuyendo, y los valores máximos forman pequeños sectores alargados con dirección N-S, coincidiendo con los cauces de los principales ríos de la llanura.

Mapa espectrométrico del potasio

El criterio aeroespectrométrico (canal del potasio), se utiliza por primera vez en el pronóstico de depósitos aluviales de arena y grava en la Llanura Sur de Pinar del Río. Esto es posible ya que la principal fuente de aporte de material terrígeno lo constituyen las areniscas cuarzo feldespáticas de la Fm. San Cayetano, las cuales aportan el potasio. Este elemento en los depósitos aluviales se puede presentar en los sedimentos arenosos cuarzo feldespáticos o en sus productos de alteración y adsorbido por las arcillas de la llanura de inundación. El análisis de este mapa (Figura 7) y su superposición con el mapa geológico y la red de drenaje, prueban la relación espacial existente entre las anomalías de potasio, los sedimentos aluviales y las corrientes fluviales.



La interpretación del mapa espectrométrico, permitió dilucidar tres aspectos fundamentales:

1. En la parte N-NW de la región se evidencian anomalías de potasio en forma de franja, desde el contacto de Sierra de los Órganos y Sierra del Rosario (río San Diego) hasta el municipio de San Juan y Martínez, extendiéndose aproximadamente 78km por toda la premontaña. Las anomalías de potasio presentan dirección NE-SW y en algunos casos los máximos coinciden con los parte aguas locales. Por la posición, extensión y orientación de las anomalías estas probablemente tienen su origen en las formaciones terrígenas que afloran en la parte occidental de la premontaña (Ej. Fm. Capdevila) combinado con la contribución de los depósitos deluviales y proaluviales originados por la erosión de las formaciones terrígenas que afloran en la cordillera, específicamente, las formaciones San Cayetano y Arroyo Cangre.
2. En la parte central del área las anomalías de potasio coinciden con la dirección de flujo de las corrientes superficiales, y los máximos están situados entre dos cauces, lo cual demuestra la migración lateral del mismo y el desarrollo de la llanura aluvial. Al sur de la llanura, en las cercanías de la costa, las anomalías de potasio presentan forma de abanicos, lo cual se interpreta como depósitos deltáticos. En la misma zona, según el mapa de suelo, se describen suelos de origen aluvial. Además, Barrios *et al.* (1988) asocian los cortes arcillosos dentro de los depósitos aluviales marinos (am Qiii-Qiv), que se distribuyen a todo lo largo de la llanura costera, con las facies de delta.
3. Al sur de la llanura, en las cercanías de la costa, las anomalías de potasio presentan forma de abanicos, lo cual se interpreta como depósitos deltáticos. En la misma zona, según el mapa de suelo, se describen suelos de origen aluvial. Además, Barrios *et al.* (1988) asocian los cortes arcillosos dentro de los depósitos aluviales marinos (am Qiii-Qiv), que se distribuyen a todo lo largo de la

La interpretación de este mapa facilita la identificación de fenómenos de piratería fluvial como ocurrió en las cercanías de la desembocadura del río Guamá, así como la dirección probable de migración de los cauces fluviales (migración hacia el occidente del curso de los ríos Los Palacios, San Diego y Herradura dejando hacia el oriente sus sedimentos aluviales). Este último aspecto es de mucha importancia para orientar correctamente los futuros trabajos de investigación a desarrollar en la zona. Para su integración, como parte del factor geofísico, el mapa espectrométrico fue reclasificado en binario y multiclasas (Tabla 2).

Mapa pronóstico para depósitos de arena y grava

En la primera etapa el resultado se obtuvo a partir de la aplicación de la lógica booleana, según la fórmula siguiente:

$$Mod_bool = (K_bool) \text{ and } (aluvial) \text{ and } (Dh_bool)$$

Donde: ***K_bool*** –Mapa binario del canal del potasio, ***aluvial*** –Mapa de sedimentos aluviales (binario), ***Dh_bool***– mapa booleano de Disección horizontal y ***and*** –operador lógico “Y”

Como se puede notar el pronóstico es extremadamente restrictivo y conservador, pues las áreas identificadas son aquellas donde coinciden los tres factores considerados. Los sectores de alto potencial forman franjas alargadas y estrechas a lo largo de toda la parte central de la llanura (Figura 8a). Posteriormente se obtuvo un mapa pronóstico a partir de la suma algebraica de los 3 mapas de evidencias, asignándole el mismo peso a cada uno de ellos (Tabla 2). La fórmula utilizada aparece debajo y los resultados se reflejan en la Figura 8b.

$$Bool = (K_bool + aluvial + Dh_bool) / 3$$

El mapa obtenido incluye las zonas del modelo booleano (favorabilidad=1) y revela sectores favorables hacia el sur de la llanura con valores de favorabilidad entre 0,6 y 0,8. Finalmente, la integración se realizó empleando el método de superposición indexada, asignando pesos diferentes a los mapas y a las clases que los conforman (Tabla 2).

Tabla 2. Pesos asignados a los mapas predictores y sus clases para los diferentes métodos de integración

<u>Mapas de evidencias</u>	<u>Lógica booleana</u>		<u>Superposición Indexada</u>				
	Etapa 1		Etapa 2		Etapa 3		
	Peso	Clase	Peso	Clase	Peso Mapa (1-3)	Peso clase (0-3)	Clase
Aluvial	1	1	1	1	2	3	1
		0		0		0	0
Disección Horizontal (DH-m/Km ²)	1	1	1	1	1	3	Alta (>3039)
		0		0		2	Media (2024-3039)
						1	Baja (<2024)
Espectrom (K %)	1	1	1	1	3	3	Alta (>1)*
		0		0		2	Media (0.75-1)
						1	Baja (<0.75)

Los mapas pronósticos (Figuras 8 y 9) representan el potencial mineral de la región para hospedar yacimientos de grava y arena asociados a los cauces fluviales de la Llanura Sur de Pinar del Río. Los mismos revelan áreas perspectivas prácticamente en toda la Llanura Sur, destacándose por su extensión, las situadas en la parte sur en las proximidades de la costa. También resultan interesantes los sectores favorables en la zona central de la Llanura, con forma alargada y dirección NW-SE, siguiendo el curso de los ríos principales como Hondo, Ajíconal, Los Palacios, Paso Viejo, Guamá, Río Feo y San Juan, los cuales quedan separados por las

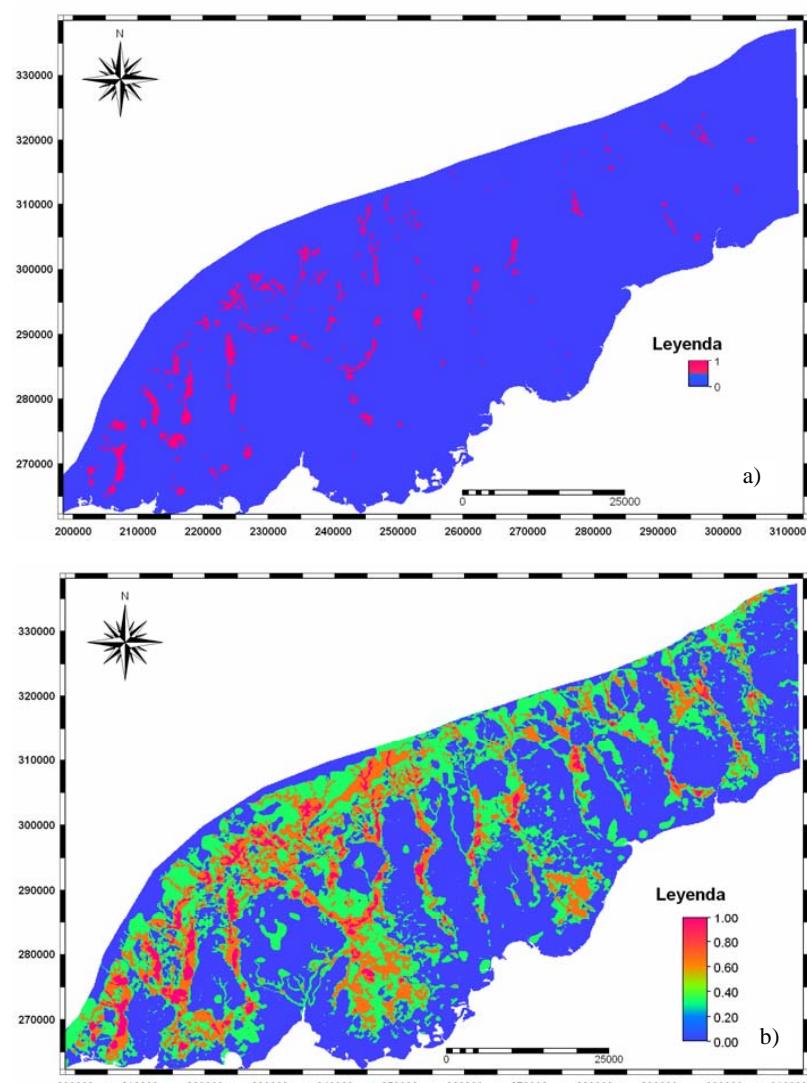


Figura 8. Mapas de potencial mineral para arena y grava fluvial. a) modelo booleano, etapa 1. b) modelo de superposición indexada, etapa 2

Sobre la base del mapa pronóstico de la última etapa y considerando los valores de favorabilidad y la extensión y coherencia espacial de los sectores se digitalizaron 24 áreas perspectivas la mayoría de ellas ubicadas en la parte central de la llanura, por debajo de la premontaña (Figura 9).

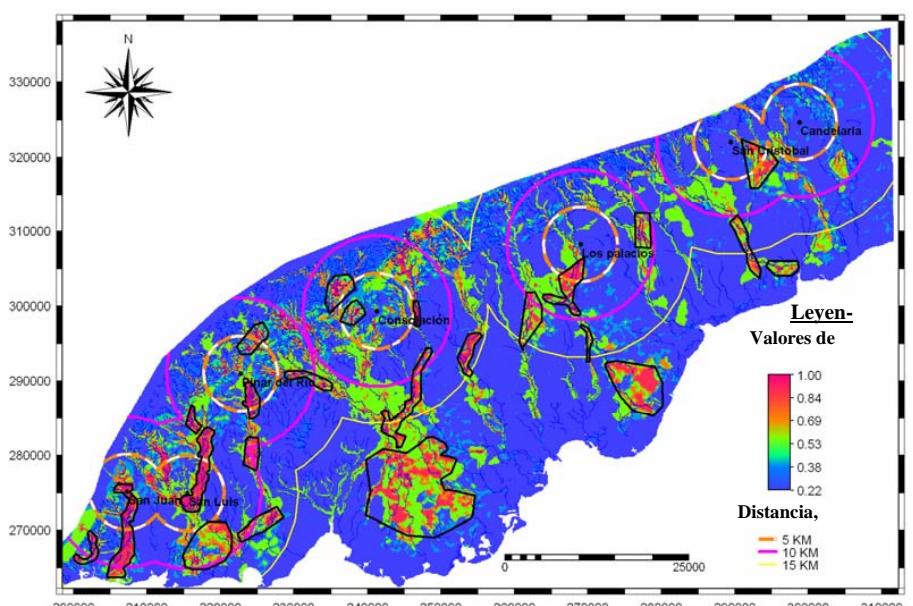


Figura 9. Mapa pronóstico final (modelo de superposición indexada - etapa 3) con los sectores perspectivos delimitados y la distancia a las cabeceras municipales.

En los yacimientos de agregados en general, y en los de grava y arena, en particular, la distancia entre estos y los centros consumidores es determinante, dado el bajo valor unitario que posee esta materia prima. Esto hace que en muchos casos la proximidad del depósito se valora más que la propia calidad del mineral. Para considerar el factor económico el mapa obtenido se superpuso con el mapa de proximidad a las cabeceras municipales reclasificado cada 5 km (Figura 9) de modo que se pueda valorar la distancia a la que se encuentran los sectores perspectivos. Como puede observarse la mayoría de los mismos, excluyendo los de la parte más meridional de la llanura, se localizan a distancias inferiores a los 15 km de las cabeceras municipales. Los futuros trabajos de prospección deben comenzar por aquellos sectores más próximos a los centros de consumo.

Análisis de la red de drenaje

Dentro de la Llanura Sur se individualizaron 6 sectores o subáreas con patrón de drenaje subhomogéneos (Figura 10, Tabla 3). Aunque el mapa de potencial obtenido sobre la base de los datos espaciales disponibles, reveló sectores favorables en casi toda la llanura existen elementos dentro de las subáreas individualizadas que permiten ordenarlas atendiendo a su potencial y limitar un poco más el pronóstico realizado. En primer lugar, en los sectores 1, 2 y 3 que coinciden con la premontaña y están limitados al norte por la falla Pinar, predominan los procesos erosivos sobre la acumulación por lo que las posibilidades de formar yacimientos aluviales es menor. Las mayores potencialidades se localizan en los cauces activos de las áreas 2 y 3.

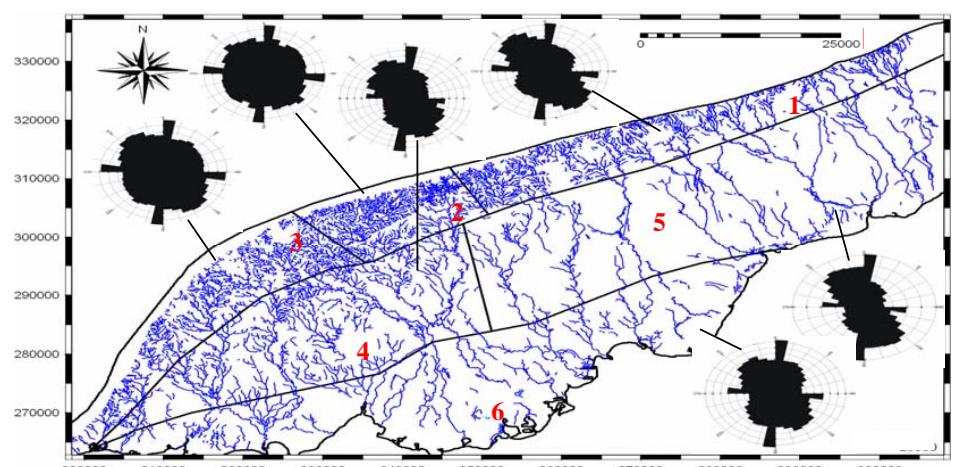


Figura 10. Mapa del área de estudio subdividido en 6 sectores subhomogéneos, con los correspondientes diagramas de rosas que muestran las direcciones principales del drenaje.

Más hacia el sur, en el sector 6, las áreas favorables ocupan grandes extensiones y coinciden con las acumulaciones de origen deltaico. Barrios *et al.* (1988) asocian los cortes arcillosos dentro de los depósitos aluviales marinos (am Qiii-Qiv) que se distribuyen a todo lo largo de la llanura costera, con las facies de delta, además

superficiales. Dentro de estos depósitos deltáicos de grano fino también se localizan sedimentos más gruesos que coinciden con cauces abandonados o antiguos distributarios y que son fuentes potenciales de grava y arena para la construcción. La granulometría más fina de los sedimentos que conforman el sector y la lejanía a las cabeceras municipales reducen las potencialidades de estas áreas. Sin embargo, estos sectores pueden abastecer a los pueblos y caseríos que se localizan en sus inmediaciones.

Tabla 3. Principales características de las subáreas individualizadas

Sector	Dirección del flujo	Patrón drenaje	Disección horizontal	Desarrollo depósitos aluviales	Sect. Fav.	Fm.
1	SE Principal SO subordinada	Dendrítico	Elevada	Mínimo	-	cp, ml, lc un, psr
2	En todas direcciones, ríos insecuentes	Dendrítico	Elevada (valores máximos)	Mínimo	2	cp, ml, lc un, psr, gne
3	En todas direcciones, SE predominante	Dendrítico	Elevada	Mínimo	3	cp, ml, un, psr, gne
4	SE	Dendrítico	Media	Máximo	7	gne, gv
5	SE	Dendrítico -paralelo	Baja	Medio	8	gv, gne
6	SE y SO	Distributario	Baja	Mínimo	4	am, b, gv

Las áreas 4 y 5, que ocupan la parte central de la llanura, desde el occidente hasta el oriente, son las de mayor potencial para la ocurrencia de grava y arena fluvial para la construcción. En ellas predominan los procesos acumulativos manifestándose formas

Los depósitos aluviales asociados a los ríos que surcan este tramo de la Llanura, poseen una amplia distribución, formando extensas llanuras de inundación y terrazas. Además, la mayoría de los principales pueblos se localizan dentro de este sector o en sus límites, lo cual reduce considerablemente los costos de transportación de la materia prima. Finalmente, la posibilidad que se deposite arena de grano medio a grueso en estos tramos de los ríos es mucho mayor, pues hacia el norte apenas hay acumulación y más al sur los sedimentos se hacen más finos predominando la fracción arcillosa. Sin embargo, existe una diferencia sustancial entre ambas subáreas, las cuencas de aporte de los ríos de la parte occidental (4) se desarrollan básicamente sobre formaciones terrígenas, mientras que las de la parte oriental (5) lo hacen sobre formaciones carbonatadas. Por esta razón los volúmenes de sedimentos acarreados por los ríos occidentales son mucho mayores y así lo es también la posibilidad de formar acumulaciones de grava y arena de interés para la construcción.

Sobre la base de todos los criterios anteriormente expuestos las distintas subáreas, en las cuales se subdividió la Llanura Sur, se ordenan de la siguiente forma atendiendo a su grado de favorabilidad para hospedar depósitos aluviales de grava y arena para la construcción: El área mas favorable es la 4 seguida por la 5, la 6, la 3, la 2 y finalmente la 1.

CONCLUSIONES

El estudio de favorabilidad en plataforma SIG demostró el alto potencial de la Llanura Sur de Pinar del Río para hospedar yacimientos aluviales de grava y arena asociados a la red de drenaje, especialmente en la parte central y centro occidental de la llanura, por debajo del borde de la premontaña. Se identificaron 24 sectores o áreas favorables, los cuales están distribuidos de la siguiente manera: cinco en la premontaña, 15 en el centro de la llanura y 4 en la parte meridional.

La mayoría de las áreas favorables identificadas (80%) se localizan a

Para estudios de pronóstico regional de arena aluvial en paleocauces se demostró la utilidad del empleo combinado de información geológica, suelos, datos morfométricos y la espectrometría gamma (canal del potasio).

El uso de la espectrometría gamma, específicamente del canal del potasio, permitió delimitar las zonas cubiertas por sedimentos aluviales, valorar el grado de desarrollo de la llanura de inundación, identificar zonas de capturas o piratería fluvial y valorar la dirección de migración de los cauces fluviales.

Sobre la base del análisis del drenaje la Llanura Sur contiene 6 sectores subhomogéneos de los cuales el 4 y el 5 constituyen los de mayor potencial para grava y arena fluvial en cauces abandonados.

REFERENCIAS

- BARRIOS, E.; MARRERO, J.; PORTUONDO, A.; NUÑEZ, R. & PLACERES, R. 1988: Levantamiento geológico a escala 1:100 000 y búsqueda acompañante Pinar Sur, Informe ONRM, La Habana, Cuba.
- BICHLER, A.J.; BROOKS, E.D. & BOBROWSKY, P.T. 2002: Sunshine coast aggregate potential mapping project (parts of NTS 092F08,09,10,15,16, 092F15,16; 092G05,06,11,12,13, 092J04, 092K01,02,03,06,07,08,09), B.C. Ministry of Energy and Mines, Fieldwork 2001, Paper 2002-1, p. 403-408.
- BLISS, J.D.; WILLIAMS, S.J. & BOLM, K.S. 2009: Modeling cape- and ridge-associated marine sand deposits; a focus on the U.S. Atlantic Continental Shelf: U.S. Geological Survey Bulletin 2209-M, 22 p.
- BLISS, J.D. & BOLM, K.S. 2007: Preliminary assessment of sand and gravel resources of Afghanistan. In: Peters, S.G.; Ludington, S.D.; Orris, G.J.; Sutphin, D.M.; Bliss, J.D. & Rytuba, J.J. *Preliminary non-fuel mineral resource assessment of Afghanistan*. U.S. Geological Survey. Open-File Report. 484-676.
- BONHAM-CARTER, G.F. 1994: *Geographic information systems for geoscientists. Modelling with GIS*. Pergamon, Ontario, 398 p.
- CARLING, P. A. & BREAKSPEAR, M.D. 2006: Placer formation in gravel-

CARRANZA, J. M. 2002: Geologically-constrained mineral potential mapping, ITC Delft, The Netherlands [Tesis doctoral] 474 p.

CHAISEN, S.; TONNAYOPAS, D. & KOOPTARNOND, K. 2002: Quaternary geologic assessment of building sand deposits in SonghKla Area. Symposium of Geology, Thailand.

COBIELLA-REGUERA, J. 2008: Reconstrucción palinspástica del paleomargen mesozoico de América del Norte en Cuba occidental y el sudeste del Golfo de México. Implicaciones para la evolución del SE del Golfo de México, *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 25(3): 382-401

COUTIN, D. P.; SANTISTEBAN- ESCALANTE, G I. & KAMENSKY, A. 1980. Texto explicativo a los mapas de yacimientos y manifestaciones de grado de estudio y pronóstico de minerales no metálicos en Pinar del Río. INFORME ONRM, La Habana, Cuba.

Cox, L. J. 1999: An evaluation of sand and gravel resources in and near the Prescott National Forest in the Verde Valley, Arizona, U.S. Geological Survey, Open-File Report 99-127.

Cox, D.P. & SINGER, D.A. 1986: Mineral deposit models. U. S. Geological Survey Bulletin, n. 1693, 379 p.

DENIS, R. & SOBRINO, E. 2006: Reconocimiento geológico de arena para la construcción en la cuenca del río Hondo. Informe ONRM, La Habana, Cuba.

DENIS, R.; SOBRINO, E.; REYES, R.; MEDEROS, J.L.; FERNÁNDEZ, R.; BORREGO, E.; REYES, D.; LAZO, P.; ESTÉVEZ, E. & DÍAZ, O. 2009: Investigaciones geológicas para arena de construcción en paleocauces fluviales de la cuencas de los ríos Hondo, San Diego y los Palacios, en la Llanura Sur de Pinar del Río. III Convención Cubana de Ciencia de la Tierra "Geociencias 2009", La Habana, 610-613.

GARCÍA-DELGADO, D. E; GIL-GONZÁLEZ, S.; DELGADO, R.D.; MILLÁN, G.; PEÑALVER, L. L.; CABRERA, M. C.; DENIS, R.; CHANG, J.L.; FUENTES, M.; DÍAZ C. O.; SUÁREZ, V.; LLANES A. I.; PÉREZ, R. A.; TORRES, M.; PÉREZ, C.P. & DÍAZ DE VILLALVILLA, L.C. 2005: Mapa geológico de la provincia de Pinar del Río a escala 1: 100 000 en base digital. I Convención Cubana de Ciencias de la Tierra "Geociencias 2005",

- GALLARDO, F. 1978: Búsqueda de arena de construcción en San Cristóbal y zona Jejenes, sur de Candelaria. Informe ONRM, La Habana, Cuba.
- HARRIS, J. R.; WILKINSON, L.; HEATHER, K.; FUMERTON, S.; BERNIER, M. A.; AYER, J. & DAHN, R. 2001: Application of GIS processing techniques for producing mineral prospectivity Maps—A case study: Mesothermal Au in the Swayze Greenstone Belt, Ontario, Canada, *Natural Resources Research*, 10(2): 91-123.
- HARRIS, J. R.; SANBORN-BARRIE, M.; PANAGAPKO, D. A.; SKULSKI, T.; & PARKER, J. R. 2006: Gold prospectivity maps of the Red Lake greenstone belt: application of GIS technology: *Can.Jour. Earth Sciences*, 43(3): 865-893.
- HICKIN, A.S.; BROOKS, E.D.; DIXON-WARREN, A.B. & BOBROWSKY, P.T. 2001: Sea to sky aggregate potential study, B.C. Ministry of Energy and Mines, Open File 2001-12.
- KLEN, L.; J. FLIMEL, R. & GAVILÁN, R. 1968: Informe sobre la búsqueda de arena para construcción en el curso del río Cuyaguateje. Informe ONRM, La Habana, Cuba.
- KNEPPER, D.H.; LANGER, W.H. & MILLER, S.H. 1994: Remote sensing and airborne geophysics in the assessment of natural aggregate resources. U. S. Geological Survey. Open-File Report 94-158
- LAWRENCE, J. D.; LANGER, W. H. & SACHS, J. S. 2002: Environmentalism and Natural Aggregate Mining. *Natural Resources Research*, 11(1):19-28.
- MARTÍNEZ, I. 1987: ¿Por qué los problemas de la arena actualmente?, En: Selección de artículos. No 3, Centro de Información de la Construcción. Pinar del Río.
- MEDEROS, J. L.; ESTÉVEZ, E.; DENIS, R. & SOBRINO, E. 2009: Perspectivas de arena para construcción en los paleocauces de la Llanura Sur de Pinar del Río. III Convención Cubana de Ciencias de la Tierra "Geociencias 2009", La Habana. Marzo 2009 [Memorias] 528-565.
- MEDEROS, J. L. 2007: Evaluación de las perspectivas de arena para construcción en paleocauces de la porción oriental de la provincia de Pinar del Río, Universidad de Pinar del Río. Cuba [Tesis de

MORENO, A. 1987: Paleocauces. Nueva fuente de materia prima arenosa en Cuba, *Selección de Artículos* No. 3, Centro de Información de la Construcción, La Habana, Cuba.

MOREIRA, R.S; ALMEIDA-FILHO, R. & CÂMARA, G. 2003: Spatial analysis techniques applied to mineral prospecting: an evaluation in the poços de caldas plateau. *Revista Brasileira de Geociências*, 33 :183-190.

NAVEA, I.; QUIÑONES, O.; GONZÁLES, R. & FAJARDO, S.1990: Prospección y exploración de arena para construcción en los márgenes del río Macurije. Informe ONRM, La Habana, Cuba.

PORWAL, A. 2006. Mineral potential mapping with mathematical geological models. University of Utrecht, The Netherlands [Tesis doctoral] 289 pp.

REGO, O.; AZUSMENDI, L.; ARGUDIN, M.; ESTRADA N.; LINARES, A. 1987: Informe de Búsqueda Orientativa y Detallada para arena de construcción al este de Pinar del Río, con cálculo de reservas correspondiente a septiembre de 1983, INFORME ONRM, La Habana, Cuba.

RICHARDS, J. & PEEL, D. 2003: The application of sustainable development principles to the Alberta Aggregates Resource Sector. *Explor. Mining Geol.*, 12(1-4):79-95.

RICKETTS, M.J. 2005: Granular aggregate mapping in southeast Labrador. Newfoundland and Labrador Department of Natural Resources Geological Survey, Report 05-1, p. 27-37

SÁNCHEZ-CRUZ, R. & RODRÍGUEZ, B. 2002. Tema de Investigación y Desarrollo No. 226 "Standarización de la Base de datos del Levantamiento aerogamma-espectrométrico (LAGE) 1: 100000 de la República de Cuba". IGP, La Habana, Cuba.

SINGER, D.A. & BERGER, V. 2007: Deposit models and their application in mineral resource assessments. In: Briskey, J.A. y Schulz, K.J., eds., Proceedings for a Workshop on Deposit Modeling, Mineral Resources Assessment, and Their Role in Sustainable Development; 31er Congreso Geológico

SUTPHIN, D.M.; DREW, L.J.; FOWLER, B.K. & GOLDSMITH, R. 2002: Techniques for assessing sand and gravel resources in glaciofluvial deposits—An example using the surficial geologic map of the Loudon quadrangle, Merrimack and Belknap ounties, New Hampshire, with the surficial geologic map by Richard Goldsmith and D.M. Sutphin: U.S. Geological Survey Professional Paper 1627, 21 p.

Elmidio Estévez Cruz
MSc en Exploración Mineral. Profesor Auxiliar.
Departamento de Geología
Universidad de Pinar del Río, Cuba

estevez@geo.upr.edu.cu

Carlos Javier Cueto Gil
Ingeniero Geólogo. Unidad de Investigaciones Aplicadas
a la Construcción, Pinar del Río, Cuba.

carlos@enia.pinar.cu

Ahmed Armando Tellez Ramírez
Ingeniero Geoólogo. Unidad de Investigaciones Aplicadas
a la Construcción, Pinar del Río, Cuba

ahmed@enia.pinar.cu