

# Pronóstico de áreas favorables para depósitos de grava y arena en la Llanura Sur occidental de Pinar del Río, Cuba

Elmidio Estévez Cruz<sup>1</sup> [estevez@geo.upr.edu.cu](mailto:estevez@geo.upr.edu.cu)  
Robert Ramírez Hernández<sup>1</sup> [rrobert@geo.upr.edu.cu](mailto:rrobert@geo.upr.edu.cu)

## Resumen

Se evalúa el potencial mineral de la Llanura Sur occidental de Pinar del Río para contener depósitos de arena y grava para la construcción. El procedimiento empleado hace uso de los sistemas de información geográfica (SIG) para procesar e integrar la información geocientífica disponible y ponderar convenientemente los mapas de evidencias relevantes. En el área de estudio, donde el modelo de yacimiento no está bien formalizado y el número de áreas patrones es reducido, se aplicaron los modelos de integración basados en los datos: método de superposición indexada y las funciones de confianza. En ambos casos el peso de los atributos fue estimado a partir de la cuantificación de la asociación espacial entre los yacimientos conocidos y los datos disponibles. El estudio se realizó por etapas intercaladas, de campo y procesamiento, lo que permitió validar los resultados e incorporar nuevas áreas patrones con características más típicas de lo que realmente se intentaba localizar. Se demostró la factibilidad del empleo del análisis espacial en SIG para realizar pronósticos de depósitos de grava y arena, se revelaron sectores de alto potencial que comprenden menos del 5% del área estudiada, se completó y formalizó el modelo de depósitos de grava y arena para la construcción y, finalmente, se identificaron los principales factores que controlan la localización de estos tipos de yacimientos en el área (suelo y vegetación).

## Palabras clave

Cartografía del potencial mineral, depósitos de grava y arena, funciones de confianza, métodos cuantitativos de integración, SIG.

## Potential areas containing sand and gravel deposits in the south western plain of Pinar del Rio, Cuba

### Abstract

The objective of this investigation was to evaluate whether the southwestern plain of Pinar del Rio is a potential mineral resource containing sand and gravel deposits. The procedure used is based on geographic information technologies (SIG) to process and integrate all available geoscientific information and weight up notable evidence maps. The data-based integration methods: indexed overlay and evidential belief functions were implemented in this field of study where deposits models are not well formalized and the number of proven aggregate deposits is limited. The significance of the characteristics was evaluated based on quantification of spatial association among proven deposits and available data. The study was carried out in alternate stages of fieldwork and data processing, which allowed that the results were validated as well as the insertion of new identified areas whose characteristics are more typical than expected. It was proven that the implementation of the spatial analysis is viable to identify gravel and sand deposits. New potential areas, representing less than 5% of the extent of the studied areas, were identified. The model of aggregate deposits was completed and formalized and the geologic factors (soil and vegetation) that control the location of sand and gravel deposits in the area were also identified.

### Key words

Mineral potential mapping, gravel and sand deposits, evidential belief functions, quantitative integration methods, GIS.

## INTRODUCCIÓN

La disponibilidad de materia prima para la industria de la construcción a un costo razonable es un factor de vital importancia para el desarrollo de la economía nacional. Los agregados naturales incluyen, por un lado, la grava y la arena que forman los sedimentos no consolidados de origen aluvial, marino, lacustre o glacial, y la piedra triturada (Langer & Knepper, 1995; Robinson et al., 2004).

Aunque este recurso mineral es una materia prima de gran volumen y bajo valor unitario dada su abundancia relativa, cada vez resulta más difícil encontrar y abrir nuevos yacimientos, como resultado de la esterilización de áreas con alto potencial mineral, especificaciones o exigencias de la industria cada vez más estrictas, altos costos de desarrollo y transportación, consideraciones ambientales y factores geológicos.

En la actualidad existe una preocupación universal por el agotamiento de esta materia prima, un número creciente de regiones en América del Norte y otras partes del mundo están experimentando una crisis de agregados; a ello contribuye la rápida expansión urbana que agota o esteriliza las reservas existentes al impedir otros posibles usos del suelo (Bobrowsky & Manson, 1996; Richards & Peel, 2003).

En la provincia de Pinar del Río, en Cuba, abundan los depósitos de arena, sin embargo, los volúmenes que se extraen resultan aún insuficientes para cubrir la demanda. Esta situación se agrava con los daños provocados por los ciclones tropicales a viviendas e instalaciones y la recuperación económica, que han propiciado el crecimiento sostenido de la demanda de estos recursos. Es por eso que contar con una evaluación de la favorabilidad de la Llanura Sur para hospedar yacimientos de grava y arena es de primordial importancia para planificar el desarrollo futuro de esta región.

La cartografía o evaluación del potencial mineral comprende la integración de mapas de distintas evidencias o indicadores del tipo de yacimiento mineral que se busca. Los mapas de evidencias representan los factores controladores de la mineralización o los criterios de prospección, que están basados en el modelo del tipo de yacimiento y en las características de los depósitos conocidos en el área. En la literatura se registran algunas propuestas de modelación del potencial para yacimientos de grava y arena, como la presentada por Bobrowsky & Manson (1996); Bliss (1998) y Sutphin et al. (2002). Todas ellas se basan en el estudio de las formas de relieve y la asociación entre éstas y los depósitos de arena. En sentido general, se reconoce la necesidad de desarrollar una metodología sistemática y objetiva que permita estimar el potencial de recursos de agregados naturales (Knepper et al., 1994). Desde 1995, el servicio geológico de la Columbia Británica, Canadá, ha implementado programas para cartografiar el potencial de agregados en Pinar del Río, generar los datos necesarios para el manejo adecuado de estos recursos y ayudar a la correcta planificación física del territorio (Bobrowsky et al., 1996a,b; Bobrowsky et al., 1998; Massey et al., 1998; Hickin et al., 2001 y Bichler et al., 2002).

Las propuestas que aparecen en la literatura han sido desarrolladas básicamente para ambientes glaciales y fluvio-glaciales, donde se manifiesta una clara asociación entre las formas del relieve y los depósitos de grava y arena y, generalmente, se dispone de abundantes yacimientos conocidos (graveras y areneras) que pueden ser usados como patrones (Hickin et al., 2001; Bichler et al., 2002 y Sutphin et al., 2002). En la mayoría de estos trabajos, como método de integración se ha empleado, de forma rutinaria, la superposición indexada (Bobrowsky et al., 1998; Massey et al., 1998; Hickin et al., 2001) en donde la importancia o peso de cada clase en los mapas de atributos se asigna sobre la base del criterio de expertos.

La modelación predictiva de depósitos de grava y arena plantea una serie de retos, pues a diferencia de otros tipos de yacimientos, como los metálicos, no se dispone de modelos lo suficientemente formalizados que faciliten el pronóstico. Esto complica la selección y ponderación de la información relevante. Otra cuestión fundamental es la carencia o insuficiencia de la información regional disponible (geofísica), y por último, la cantidad de depósitos conocidos para usos específicos de esta materia prima es limitada.

Este trabajo está dirigido a evaluar el potencial mineral, para depósitos de grava y arena, de la parte sur occidental de la Llanura Sur de Pinar del Río, a través de un procedimiento basado en el análisis espacial en un sistema de información geográfica (plataforma SIG). Se discute el empleo de métodos cuantitativos de integración más complejos que los reportados en la literatura para este tipo de materia prima. El área de estudio se ubica mayormente en el municipio Sandino y comprende la totalidad de la llanura aluvial lacustre del istmo La Fe–Cortés (Figura 1).

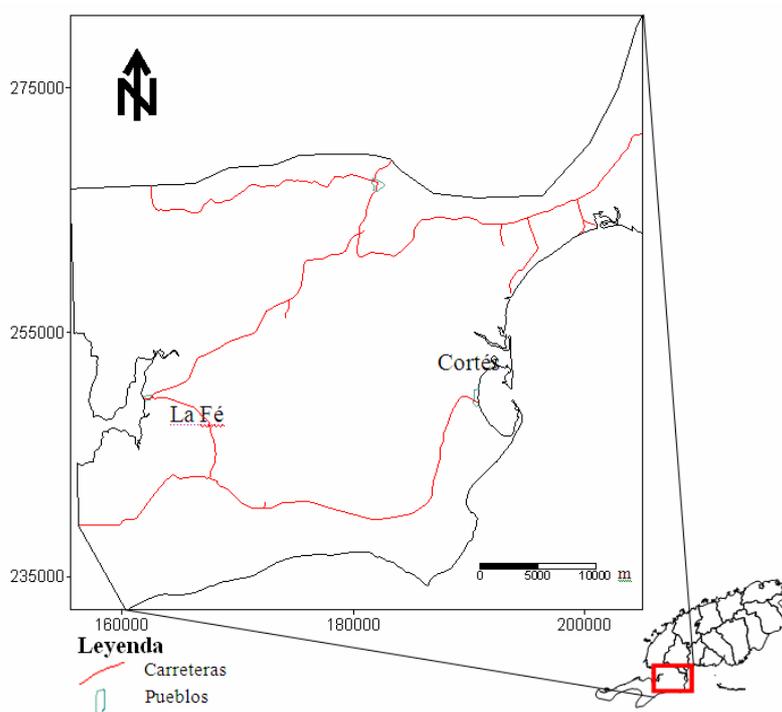


Figura 1. Mapa de localización del área de estudio.

### Características geológicas del área de estudio

Desde el punto de vista geológico, en el área aparecen secuencias que van desde el Jurásico Superior hasta depósitos del Cuaternario (Figura 2). En la mayor parte del territorio alcanzan una amplia distribución los sedimentos del Plioceno–Cuaternario, que constituyen un manto de materiales friables y proceden, principalmente, de la meteorización de las rocas terrígenas de la Formación San Cayetano, ubicada mucho más al norte dentro de las secuencias de Guaniguanico. Se distinguen aquí los depósitos arcillo-arenosos de la Formación Guane y las arenas cuarzosas que pueden correlacionarse con la Formación Sigüanea, así como los depósitos del Cuaternario no agrupados en ninguna formación o grupo (Freire & Peláez, 1981; Pimentel & Denis-Valle, 2008).

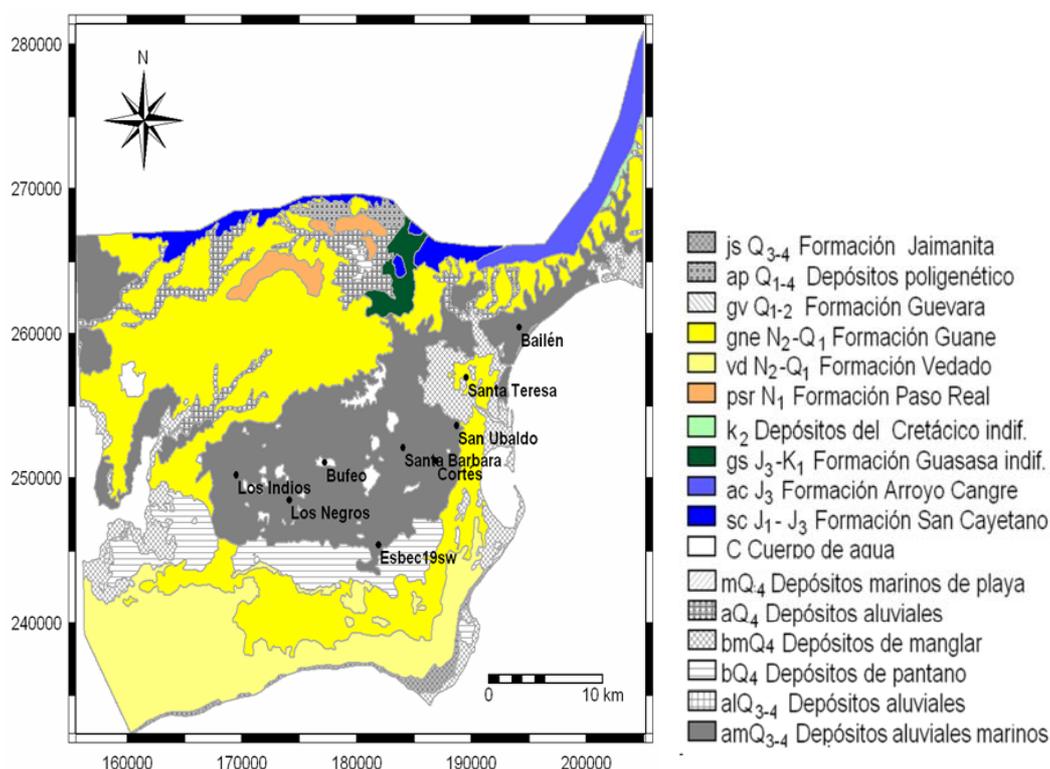


Figura 2. Mapa geológico del área mostrando los yacimientos de arena conocidos (según Instituto del Geología y Paleontología, 2002).

### MATERIALES Y MÉTODOS

El diagrama de flujo que refleja la metodología empleada en este trabajo se muestra en la Figura 3. La metodología se seleccionó sobre la base de los objetivos trazados, las características

geológicas del área y de los yacimientos buscados, y finalmente, de la información geocientífica disponible.

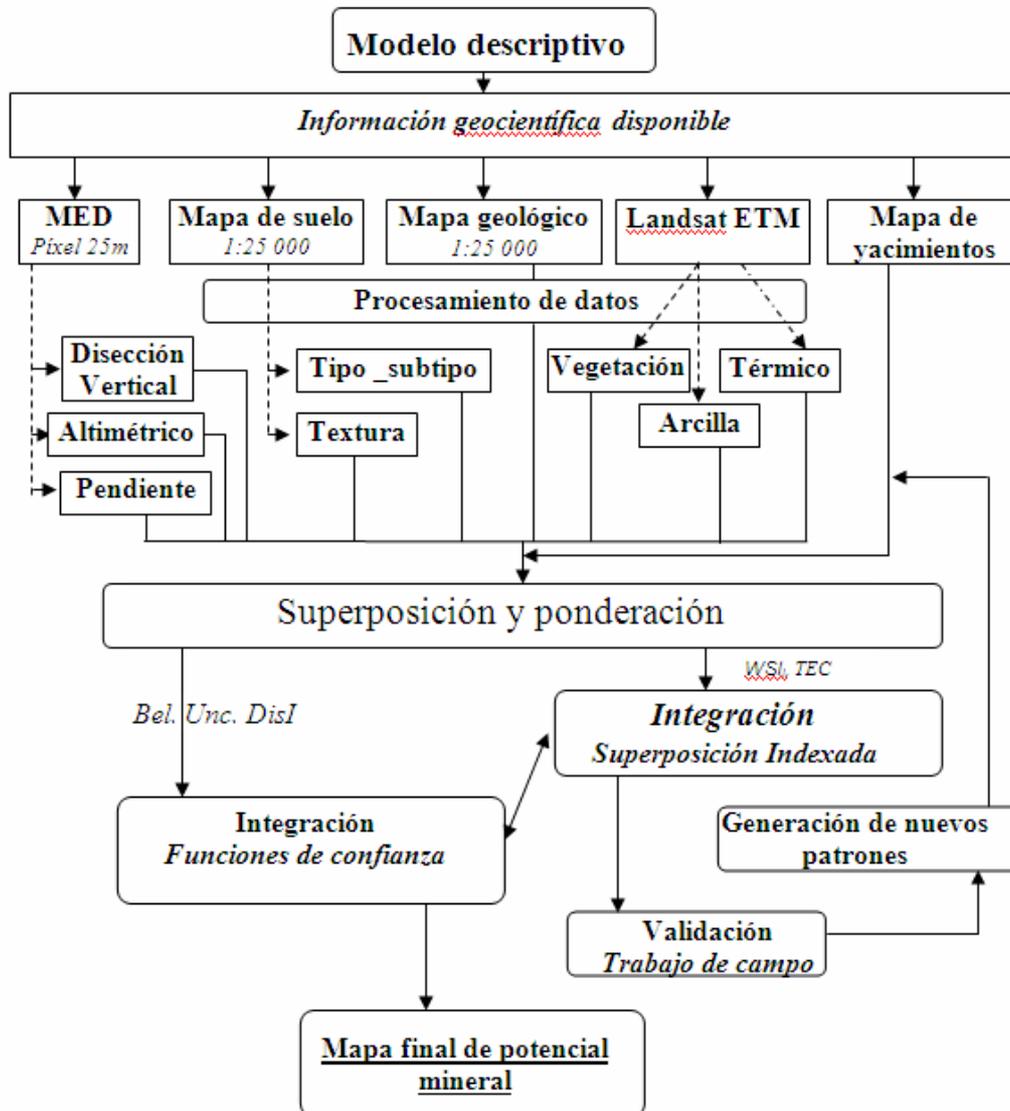


Figura 3. Diagrama de flujo de la metodología empleada.

### Tipificación de los depósitos y selección del modelo descriptivo de yacimiento

Los modelos de yacimientos minerales se definen como un conjunto sistemático de información que describe los atributos esenciales o propiedades de una clase de yacimientos minerales (Singer & Cox, 1988; Bliss, 1993; Bliss & Page, 1994). Los modelos descriptivos de yacimientos minerales juegan un papel fundamental en la selección y

derivación de los mapas de evidencias para el tipo de yacimiento buscado y en la asignación de los pesos a los mapas escogidos (Bonhan-Carter, 1994).

A diferencia de los yacimientos metálicos y de un número determinado de minerales industriales, para los cuales existen modelos descriptivos bien establecidos, para los depósitos de grava y arena no se registran modelos lo suficientemente formalizados que faciliten el pronóstico (Lindsey, 1997; Bliss & Miller, 1999). Bliss (1998) considera que los modelos descriptivos para depósitos de arena y grava (agregados) están aun por desarrollar. Los modelos, según el mismo autor, probablemente se fundamentarán en la geomorfología, las rocas de caja, las formas y ambientes sedimentarios. Según Knepper et al. (1994) existe un rango amplio de características que pueden proporcionar información útil sobre la existencia y la distribución de depósitos potenciales de arena y grava; entre los más importantes se señalan: formas del relieve, patrón y densidad de la red de drenaje, vegetación, textura del suelo (arcilloso, limoso o arenoso), uso del suelo y contexto geológico.

Los yacimientos de arena sílice del área de estudio no escapan de este problema, por lo que aquí sólo se esbozan características generales de estos depósitos que permitieron orientar el trabajo para evaluar el potencial de la zona.

Los yacimientos de arena, generalmente, presentan similitudes muy favorables en aspectos geomorfológicos e hidrográficos que los identifican como indicadores directos para la prospección y localización de los mismos. Según Hernández et al. (1987), la mayor parte de estos yacimientos aparecen asociados a un relieve llano, en el que las cotas no exceden los 25 m, con amplio desarrollo de la red hidrográfica formada por grandes ríos y arroyos. El mismo autor plantea que los yacimientos están asociados con zonas llanas, de poca vegetación y fototonos claros en fotos aéreas.

La presencia de la Formación San Cayetano como fuente de aporte, las características del relieve, la abundancia de vegetación, el tipo de suelo que los cubre y su localización en sedimentos del cuaternario, constituyen los rasgos más relevantes que fueron empleados para orientar el pronóstico.

En la zona de estudio se han revelado y explorado un número significativo de yacimientos de arena cuarzosa, evaluados principalmente para la producción de vidrio (Figura 2). Entre los principales yacimientos se encuentran: Santa Teresa, Bailén, Cortés, Bufeó, Los Indios, Los Negros, Santa Bárbara, San Ubaldo y Esbec19SW. La mayoría de estos yacimientos, a excepción de Esbec 19SW, se han evaluado como materia prima para la producción de vidrio y poseen una génesis aluvial marina (Kukla, 1966; Freire, 1968,1978; Freire & Peláez, 1981)

### **Captura y procesamiento de datos**

Los datos primarios espaciales, a partir de los cuales las evidencias de los criterios o factores controladores fueron extraídas, incluyen: modelo de elevación digital con tamaño de píxel de 25 m (Geocuba, 2001), mapa geológico 1:100 000 (Instituto de Geología y Paleontología, 2002), imágenes satelitales Landsat ETM+ (path 16 row 45\_7t, 2000), mapa de suelos 1:25 000 (Departamento de suelo, MINAGRI, 2002) y mapa de yacimientos, obtenido a partir de la digitalización de los datos de exploración de los yacimientos existentes en el área. La entrada de datos, álgebra de mapas y el análisis espacial fueron ejecutados usando el SIG ILWIS 3.4. Los mapas bases se procesan para derivar los mapas que definen los factores controladores.

El modelo de elevación digital (MED) fue procesado para obtener los mapas morfométricos (pendiente, disección vertical y altimetría), los cuales fueron posteriormente reclasificados en distintos intervalos.

Las imágenes del Landsat ETM ortorectificadas y georeferenciadas en UTM, se transformaron al sistema Cuba Norte. Posteriormente se procesaron empleando operaciones multibandas y clasificaciones para extraer los siguientes factores:

*Vegetación.* Algunos autores que han trabajado en el área han señalado que la vegetación es escasa en aquellos lugares donde existen yacimientos de arena (Hernández et al., 1987). El mapa de cobertura vegetal se derivó del índice de vegetación (NDVI).

*Contenido de arcilla.* Toda el área de estudio está constituida por sedimentos areno-arcillosos y arcillo-arenosos (Freire & Peláez, 1981; Pimentel & Denis-Valle, 2008), por esta razón aquellos sectores con altos contenidos de arcilla necesariamente poseen bajo contenido de arena y por consiguiente bajo potencial. Los sectores empobrecidos en minerales arcillosos son los de mayor favorabilidad. La combinación Tm5/Tm7 se empleó para mapear aquellas zonas de bajo contenido de arcilla (alto rendimiento de arena).

*Factor térmico.* Desde el punto de vista geológico una parte significativa de la llanura la Fe –Cortés esta constituida por sedimentos del Cuaternario, que además cubren u hospedan la mayoría de los yacimientos de arena conocidos en el área. Por esta razón se intentó una discriminación litológica sobre la base de la diferencia de temperatura de los depósitos de la cobertura. Lillesand & Kierfer (1994) reportan el empleo de la segmentación de la banda térmica (*level slicing*) para mostrar rangos discretos de temperatura codificados en tonos de grises o en colores que permiten la diferenciación litológica, la cartografía del tipo de suelo o de la humedad del mismo. La banda térmica del Landsat ETM+ fue discretizada en intervalos para su utilización en el procesamiento.

Del mapa de suelo a escala 1:25 000 se derivaron los mapas de textura y de tipo-subtipo de suelos.

### **Integración y análisis**

La etapa final de los trabajos fue la integración de todos los mapas obtenidos y el posterior análisis de los resultados. En la literatura se reportan distintos métodos cuantitativos de integración (Agterberg et al., 1990; Bonham-Carter et al., 1988; Bonham-Carter, 1994; Carranza, 2002; Porwal, 2006). Estos métodos se clasifican en: métodos basados en los datos -modelos objetivos- y métodos basados en el conocimiento -modelo subjetivo- (Bonham-Carter, 1994).

Como el modelo descriptivo de yacimientos de arena no está bien formalizado y no se conoce a ciencia cierta la importancia real de cada uno de los mapas de evidencias para la ocurrencia de los depósitos de grava y arena se decidió emplear métodos estadísticos, basados en las probabilidades condicionales, para asignar el peso a cada una de las clases de los mapas de parámetros. Fueron utilizados dos modelos de integración: Funciones de confianza (*Evidencial Belief function*) y una variante del método de superposición indexada en la que los pesos de cada evidencia son derivados a partir de los datos.

Como los modelos sustentados en los datos necesitan un número grande de yacimientos o manifestaciones y en el sector de trabajo la cantidad de patrones es reducida, se decidió tratar cada yacimiento como una zona o polígono, en lugar de considerarlos como un punto. Este enfoque se justifica por el hecho de que los yacimientos de arena generalmente ocupan áreas relativamente extensas dentro de la región de estudio.

#### *Método de superposición indexada*

Es un método simple, en el cual 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). En este estudio se

empleó una variante del método en la cual la ponderación se estimó a partir de los datos y no de forma subjetiva. El peso (WSI) de cada clase se determinó a partir del logaritmo natural de la densidad de yacimientos en la clase, dividido por la densidad de yacimientos en todo el mapa (expresión 1). Esta forma de calcular el peso es una modificación de la medida informativa de Shenon (Lepin & Ariosa, 1986) que se ha empleado para calcular la posibilidad de información las variables.

$$WSI_i = \ln\left(\frac{Densclass}{Densmap}\right) = \ln\left(\frac{\frac{Npix(S_i)}{Npix(N_i)}}{\frac{\sum Npix(S_i)}{\sum Npix(N_i)}}\right) \quad (1)$$

Donde:

*WSI<sub>i</sub>*- El peso dado a cierta clase de un mapa de atributos. Ejemplo: tipo de suelo, unidad litológica o rango de pendiente o disección vertical.

*Densclass*- Densidad de yacimientos dentro de la clase dada o la probabilidad condicional de la presencia de yacimiento dada la existencia de la clase

*Densmap*- Densidad de yacimientos dentro del mapa analizado o la probabilidad a priori de los yacimientos en el área de estudio

*Npix(S<sub>i</sub>)*- Número de píxeles o área contenido en cierta clase de un mapa de atributos.

*Npix(N<sub>i</sub>)*- Número total de píxeles dentro de la clase.

También se usó, para valorar la importancia relativa de cada clase, la llamada tasa de eficiencia de captura (TEC), la cual permite ordenar o jerarquizar las capas o variables (Brown et al., 2003) y cuantificar la asociación espacial entre los yacimientos conocidos y los distintos mapas de evidencias (Porwal, 2006). Este coeficiente también es un indicador de la probabilidad condicional de la ocurrencia de yacimientos dada la presencia de la clase del mapa de evidencias.

$$TEC = D \times D/A$$

Donde: D- Porcentaje de los depósitos conocidos dentro de una clase del mapa de evidencia, A- Porcentaje del área de estudio ocupada por la clase.

### *Funciones de confianza (Evidential Belief functions)*

Las funciones de confianza (EBF) permiten cuantificar las incertidumbres asociadas a los mapas de evidencias (Carranza et al., 2005; An et al., 1994). La mayoría de las aplicaciones de EBF para la cartografía del potencial mineral se apoyan en modelos basados en el conocimiento. La teoría de Dempster - Shafer proporciona el marco para evaluar las EBF, las cuales se integran siguiendo las reglas desarrolladas por Dempster (1968).

La estimación de las funciones de confianza está siempre relacionada con una proposición que en este caso es la siguiente: sobre la base de las evidencias espaciales un área dada es favorable para alojar depósitos de grava y arena para la construcción. Las EBF son grado de confianza (Bel), grado de desconfianza (Dis), grado de incertidumbre (Unc) y grado de plausibilidad (Dempster, 1968). La confianza y la plausibilidad representan respectivamente la probabilidad inferior y superior de que la evidencia sustenta la proposición. La incertidumbre representa la ignorancia o duda en la proposición dada la evidencia. La desconfianza es la probabilidad de que la proposición es falsa basada en una evidencia dada. Se han desarrollado diversos procedimientos para estimar las funciones de confianza en modelos basados en los datos (Chung & Fabbri, 1993; An et al. 1994).

En este trabajo se adopta la propuesta realizada por Carranza & Hale (2003) y Carranza et al. (2005) basada en distintas probabilidades condicionales: a) la existencia de yacimientos dada la presencia de una clase del mapa de

evidencia, b) la existencia de yacimientos dada la ausencia de una clase del mapa de evidencia, c) la ausencia de yacimientos dada la presencia de una clase del mapa de evidencia, d) la ausencia de yacimientos dada la ausencia de una clase del mapa de evidencia.

## RESULTADOS

Los resultados de la evaluación del potencial se acompañaron de trabajos de campo, lo que permitió validar y corregir el pronóstico inicial realizado. En un primer momento la evaluación se realizó utilizando todos los yacimientos de arena conocidos en la región, excluyendo Santa Bárbara y Cortés, usados para validar el proceso de integración, independientemente del uso para el cual los mismos fueron estudiados. Este enfoque se justifica pues solamente el yacimiento Esbec 19SW constituye fuente de materia prima de arena para la construcción, de igual forma San Ubaldo se ha empleado indistintamente para este fin, el resto de los depósitos conocidos han sido estudiados para la producción de vidrio de alta calidad (Santa Teresa, Los Indios, Los Negros, Bailen, Bufeó).

En el mapa preliminar de favorabilidad se emplearon los siguientes ocho mapas de evidencias: mapa geológico, disección vertical, pendiente, contenido de arcilla, térmico, vegetación, tipo-subtipo de suelo y textura. Los pesos (WSI), calculados para cada una de las clases a partir de la superposición de estos con el mapa binario de yacimientos minerales, se muestran en la Tabla 1 (columna A).

Según al mapa geológico empleado en este estudio, todos los yacimientos se asocian a los sedimentos cuaternarios (am Q 3-4 y bm Q4) y a la Formación Guane. Sobre la Formación Guane y asociado con bm Q4 se localiza únicamente el yacimiento Santa Teresa (Figura 2). La superposición del mapa de suelo con el de yacimientos minerales y los pesos calculados revelan que los yacimientos

se relacionan espacialmente con los suelos arenosos cuarcíticos típicos y gleysosos, mostrando este último la máxima correlación. También se demuestra que todos los depósitos se localizan en áreas donde existen suelos con textura arenosa.

Tabla 1. Pesos (WSI) calculados para las distintas clases de los mapas de atributos A) pesos calculados empleando todos los yacimientos independientemente del uso B) empleando yacimientos de arena para la construcción.

A		B	
Mapas de evidencias	Peso (WSI)	Mapas de evidencias	Peso (WSI)
<b>Veg</b>		<b>Veg</b>	
abundante vegetacion	-0.4418	abundante vegetacion	-0.8472
escasa vegetacion	0.4367	escasa vegetacion	0.6931
<b>Arcilla</b>		<b>Arcilla</b>	
alta arcillosidad	-0.7932	alta arcillosidad	-1.9456
baja arcillosidad	0.4212	baja arcillosidad	0.619
<b>Geologia</b>		<b>Geologia</b>	
bmQ4	0.8232	amQ3-4	1.4271
amQ3-4	0.2007	El resto	-9.2103
gne N2-Q1	0.3385		
El resto	-9.2103		
<b>Pendiente (°)</b>		<b>Pendiente (°)</b>	
(0-0.5)	0.3345	(0-0.5)	-0.619
(0.5-1)	-0.1473	(0.5-1)	0.869
(1-2)	-1.5823	(1-2)	0.5705
(2-4)	-1.8925	(2-4)	-1.1786
(>4)	-4.2904	(>4)	-9.2103
<b>Textura</b>		<b>Textura</b>	
J (arena)	0.9057		
El resto	-9.2103		
<b>Tipo_sub</b>		<b>Tipo_sub</b>	
Arenoso cuarcitico típico	-0.2364	Arenoso cuarcitico típico	0.1251
Arenoso cuarcitico Gleysoso	1.9333	Arenoso cuarcitico Gleysoso	1.8563
El resto	-9.2103	El resto	-9.2103
<b>Disecc. Vertical</b>		<b>Disecc. Vertical</b>	
(0-2.5)	0.3964	(0-2.5)	-0.7733
(2.5-5)	-0.1144	(2.5-5)	1.1727
(5-10)	-2.6941	(5-10)	-0.08
>10	-9.2103	>10	-9.2103
<b>Térmico</b>		<b>Térmico</b>	
alta emisividad	0.8162	muy alta emisividad	1.8153
baja emisividad	-0.1824	alta emisividad	2.3026
		media emisividad	1.9859
		baja emisividad	-1.9456

\*el peso -9.2103 indica que los yacimientos no se encuentran en esa clase

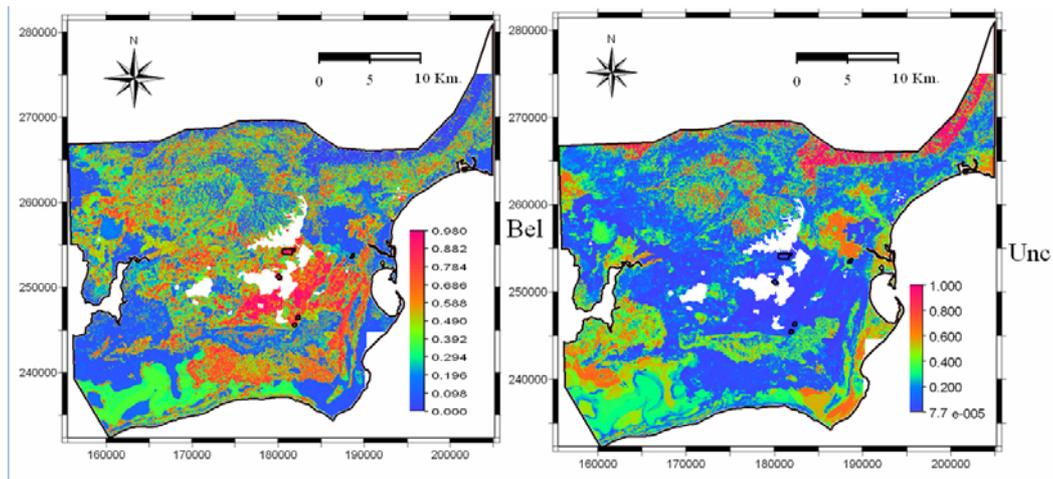


Figura 4. Mapa de potencial reclasificado en tres clases de favorabilidad obtenido a partir del método modificado de superposición indexada con los yacimientos conocidos superpuestos (a), mapa de potencial binario (b).

El mapa de vegetación derivado del NDVI fue reclasificado en dos clases. El valor de corte se seleccionó comparando los resultados con un compuesto de color verdadero en el que se observa muy bien la vegetación. Los resultados demuestran la clara correlación espacial de los depósitos conocidos con las áreas de escasa vegetación. El mapa de contenido de arcilla, derivado de la combinación Tm5/Tm7, fue reclasificado en dos categorías: bajo contenido y alto contenido de arcilla. El umbral empleado fue escogido sobre la base del análisis del histograma. Los pesos calculados confirman que la mayor proporción de depósitos se localizan en la clase "bajo contenido". El mapa térmico que se derivó de la reclasificación en dos clases de la banda térmica, muestra una elevada asociación espacial ( $WSI=0,81$ ) en la clase alta emisividad.

En el caso de los mapas morfométricos se evidencia que los depósitos aparecen en áreas con disección vertical menores de  $10 \text{ m/km}^2$  y en todas las clases de pendientes, lo que provoca que esta última variable sea la que muestra el menor peso entre todas las evidencias consideradas.

El mapa pronóstico obtenido reclasificado en tres niveles de favorabilidad se muestra en la Figura 4a, como puede observarse todos los depósitos, incluyendo los que no fueron considerados para estimar los pesos, se ubican en las clases media alta. En general, aproximadamente el 75% de los píxeles que conforman los yacimientos pertenecen a dichas clases, lo cual puede considerarse adecuado si se tiene en cuenta que se han utilizado en la derivación de los pesos dos tipos diferentes de yacimientos de arena.

Las áreas reveladas (Figura 4b) en la evaluación preliminar fueron chequeadas con trabajos de campo, lo cual junto con información brindada por habitantes del lugar permitió definir tres nuevos sectores con características muy similares al tipo Esbec 19SW. Dichos sectores y el yacimiento Esbec19 SW permitieron realizar una nueva evaluación del potencial del área empleando esta vez sólo patrones de yacimientos o manifestaciones de arena y grava para la construcción. En esta nueva cartografía del potencial mineral se empleó el mismo método anterior, complementado con los pesos estimados según la tasa de eficiencia de captura, y el método de funciones de confianza para contrastar los resultados obtenidos.

Los pesos recalculados (WSI) usando los nuevos patrones se muestran en la Tabla 1 (columna B). En este caso el mapa de textura se omitió y la clase alta emisividad del térmico fue subdividida en tres subclases. Se observan importantes variaciones en las asociaciones espaciales de las distintas evidencias, fundamentalmente en las morfométricas.

Para aplicar el método de las funciones de confianza (EBF), considerando los yacimientos o manifestaciones que constituyen patrones de arena para la construcción, se seleccionaron las siguientes evidencias: Contenido de arcilla, térmico, vegetación, tipo - subtipo de suelo, pendiente, disección vertical. Además, se adicionó el mapa altimétrico dada la posibilidad de que los yacimientos de arena estén asociados a un determinado rango

hipsométrico, también se eliminaron los mapas textura y geológico pues en estos mapas los patrones de arena se concentran en una sola clase que además abarca un porcentaje elevado del área de estudio por lo que su capacidad de discriminación es baja. Todos los mapas de atributos numéricos fueron discretizados en 10 clases empleando el percentil 10.

Para el cálculo de las funciones de confianza, cada mapa de evidencia en forma de clases de atributos fue superpuesto con el mapa binario de yacimientos de forma que se pueda establecer la cantidad de píxeles pertenecientes al mapa de yacimientos que se superponen o coinciden con las distintas clases de los mapas de evidencia (Tabla 2). El mapa final de potencial mineral (Figura 5) se obtuvo integrando las funciones de confianza, utilizando las reglas desarrolladas por Dempster, 1968.

En el mapa térmico, los valores de la función confianza (Bel) e incertidumbre (Unc) van aumentando y disminuyendo respectivamente en los rangos de percentiles del 80 al 100, siendo máximo para Bel y mínimo para Unc en el percentil 100, esto demuestra que el factor térmico constituye una evidencia positiva de la existencia de depósitos de arena. Los mapas Vegetación y Arcilla muestran un incremento y disminución de los valores de Bel y Unc hacia los percentiles inferiores, exhibiendo la máxima asociación en la clase del percentil 20. En los mapas morfométricos, se observa un rango de valores, que constituyen clases sucesivas, donde la función Bel aumenta paulatinamente hasta alcanzar el máximo: altimetría (7-16m), disección vertical (2,9-6 m/km<sup>2</sup>) y pendiente (0,5-2); este comportamiento regular confirma que el relieve es también una evidencia positiva. Por último, los suelos arenoso cuarcíticos típico y gleysoso muestran los mayores valores de la función Bel.

Tabla 2. Funciones de confianza calculadas para las distintas clases de los mapas de evidencias.

Mapas evid.	Bel	Dis	Unc	TEC	WSI	Mapas evid.	Bel	Dis	Unc	TEC	WSI
<b>Pendiente (°)</b>						<b>Veget -NDVI</b>					
0-0.5	0.06	0.25	0.69	504.98	-0.52	10	0.12	0.17	0.71	618.25	0.46
0.5-1.0	0.56	0.25	0.19	2587.27	0.91	20	0.65	0.17	0.18	6472.65	1.63
1.0-2.0	0.33	0.25	0.42	940.62	0.62	30	0.14	0.17	0.69	851.55	0.62
2.0-4.0	0.05	0.25	0.70	17.87	-1.16	40	0.06	0.17	0.77	175.51	-0.17
>4.0	0.00	0.00	1.00	0.11	-3.63	50	0.03	0.17	0.80	48.65	-0.78
<b>Diseccción vert.I (m/Km2)</b>						<b>Term.</b>					
0.2-0.5	0.00	0.00	1.00	0.00	-10.00	60	0.01	0.17	0.82	2.95	-2.21
0.5-0.8	0.00	0.00	1.00	0.00	-10.00	70	0.00	0.00	1.00	0.02	-4.86
0.8-1.3	0.00	0.00	1.00	0.06	-4.14	80	0.00	0.00	1.00	0.02	-4.73
1.3-2.0	0.01	0.20	0.79	9.21	-1.65	90	0.00	0.00	1.00	0.00	-5.45
2.0-2.9	0.09	0.20	0.71	322.03	0.13	100	0.00	0.00	1.00	0.00	-5.65
2.9-4.3	0.25	0.20	0.55	1590.87	0.92	10	0.00	0.00	1.00	0.00	-10.00
4.3-6.6	0.42	0.20	0.38	3270.78	1.28	20	0.00	0.00	1.00	0.00	-10.00
6.6-11.5	0.22	0.20	0.58	1357.93	0.85	30	0.00	0.00	1.00	0.00	-10.00
11.5-300	0.00	0.00	1.00	0.40	-3.22	40	0.00	0.00	1.00	0.00	-10.00
>300	0.00	0.00	1.00	0.00	-10.00	50	0.00	0.00	1.00	0.00	-10.00
<b>Altim.(m)</b>						<b>Arcilla</b>					
1.0-2.0	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	60	0.01	0.20	0.79	1.94	-2.33
2.0-3.0	0.00	0.00	1.00	0.02	-4.80	70	0.01	0.20	0.79	8.41	-1.80
3.0-5.0	0.00	0.00	1.00	0.81	-2.86	80	0.05	0.20	0.75	138.76	-0.24
5.0-7.0	0.02	0.20	0.78	11.57	-1.52	90	0.30	0.20	0.50	2951.95	1.32
7.0-9.0	0.06	0.20	0.74	183.60	-0.14	100	0.63	0.20	0.17	7140.02	1.61
9.0-11.0	0.37	0.20	0.43	3097.49	1.27	10	0.12	0.17	0.71	535.65	0.40
11.0-16.0	0.42	0.20	0.38	3614.70	1.35	20	0.50	0.17	0.33	4262.44	1.42
16.0-27.0	0.12	0.20	0.68	594.83	0.45	30	0.24	0.17	0.59	1615.42	0.95
27-500	0.00	0.00	1.00	0.00	-10.00	40	0.08	0.17	0.75	260.10	0.03
>500	0.00	0.00	1.00	0.00	-10.00	50	0.03	0.17	0.80	53.11	-0.76
<b>Suelo</b>						<b>Suelo</b>					
XXVIIAp3	0.06	0.34	0.60	600.32	0.29	60	0.02	0.17	0.81	14.77	-1.40
XXVIIIFp3	0.62	0.33	0.05	9271.13	1.97	70	0.00	0.00	1.00	0.40	-3.22
XXVIIIFp4	0.31	0.33	0.36	3674.38	1.70	80	0.00	0.00	1.00	0.27	-3.39
						90	0.00	0.00	1.00	0.02	-4.77
						100	0.00	0.00	1.00	0.00	-10.00

Bel-confianza, Dis-desconfianza, Unc-incertidumbre, TEC-coeficiente de eficiencia de captura, WSI-peso

El mapa de potencial, obtenido por este método de integración, muestra un patrón general similar al obtenido con el método de superposición indexada en sus dos variantes (WSI y TEC). Como regularidad se logró establecer que la parte oriental de la llanura es la más perspectiva y que los sectores favorables se localizan en franjas con orientación NE-SW, paralelas a la posición de la costa actual, que probablemente constituyen antiguas posiciones de la línea de costa (Figura 5).

Tradicionalmente, los mapas pronósticos se validan comprobando si son capaces de identificar aquellos yacimientos que no son empleados en la calibración del modelo (Harris et al., 2003; Carranza et al., 2005; Nykanen y Ojala, 2007; Porwal et al., 2006). Este enfoque es imposible de aplicar en el área de estudio por la poca cantidad de yacimientos de grava y arena para la construcción que se conocen. Dada esta circunstancia, los

resultados obtenidos se chequearon empleando dos vías diferentes: a) contrastando los mapas de potencial mineral obtenidos por diferentes métodos a partir de la matriz decorrelación b) analizando la distribución de los yacimientos conocidos en los distintos niveles de favorabilidad de los mapas pronósticos obtenidos.

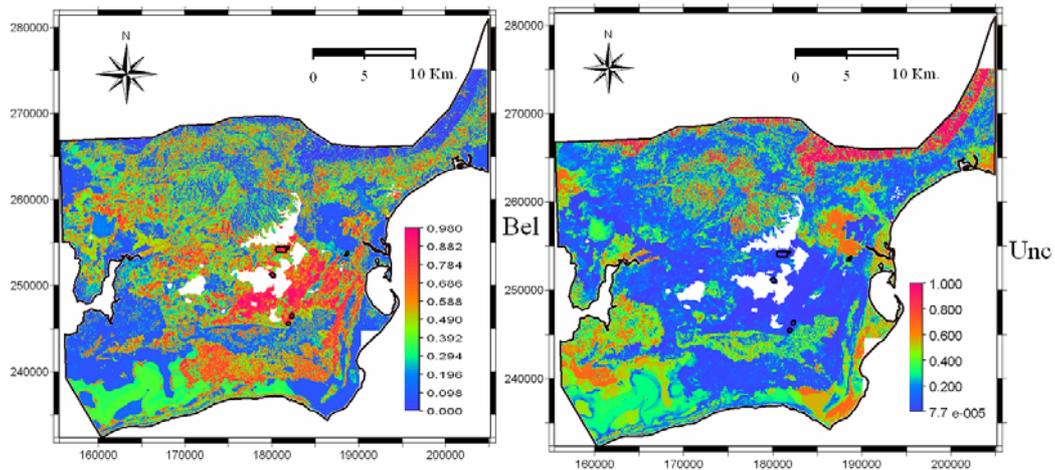


Figura 5. Mapas integrados de confianza e incertidumbre mostrando los sectores usados como patrones, nótese como estos se localizan en las áreas de mayor grado de confianza y menor incertidumbre.

La matriz de correlación entre los mapas de favorabilidad estimados a partir de diversos modelos de integración muestra que los resultados son comparables, observándose la mayor correlación entre el mapa integrado de la función confianza (EBF) y el generado a partir del método de superposición indexada con los pesos TEC (Tabla 3).

Tabla 3. Matriz de correlación entre los mapas pronósticos obtenidos empleando distintos modelos de integración

	prono_EBF	prono_WSI	prono_TEC
prono_EBF	1	0.73	0.89
prono_WSI		1	0.75
prono_TEC			1

Los mapas de favorabilidad fueron reclasificados en diez clases, considerando el percentil 10 y superpuestos con el mapa de los patrones de arena, lo que permitió establecer cómo se distribuyen los depósitos conocidos en las distintas clases de favorabilidad (Tabla 4). En todos los casos el nivel más alto de favorabilidad (90-100) es capaz de revelar más del 75% de las áreas pertenecientes a los yacimientos conocidos, lo cual constituye una buena tasa de predicción.

Tabla 4. Distribución de los píxeles de los yacimientos de arena en los niveles de favorabilidad de los mapas pronósticos obtenidos.

Clases	prono_EBF		prono_TEC		prono_WSI	
	Npix_depósito	Porcentaje	Npix_depósito	Porcentaje	Npix_depósito	Porcentaje
40	9	0.37	2	0.08	2	0.08
50	11	0.45	1	0.04	3	0.12
60	22	0.89	7	0.28	13	0.53
70	141	5.72	30	1.22	25	1.01
80	121	4.91	31	1.26	59	2.39
90	280	11.36	210	8.52	141	5.72
100	1881	76.31	2184	88.60	2222	90.14

Para facilitar el uso y la interpretación del mapa de favorabilidad, éste fue convertido en binario (Figura 6a). El valor de corte (0,85) se seleccionó gráficamente y coincide con un punto de inflexión en el cual la favorabilidad aumenta rápidamente mientras que apenas ocurre un incremento del área acumulada (Figura 6b). A pesar de las complicaciones inherentes en la modelación del potencial de los yacimientos de arena, los mapas pronósticos obtenidos permitieron identificar las áreas de mayor favorabilidad discriminando aproximadamente el 95 % del área inicial (Figura 6).

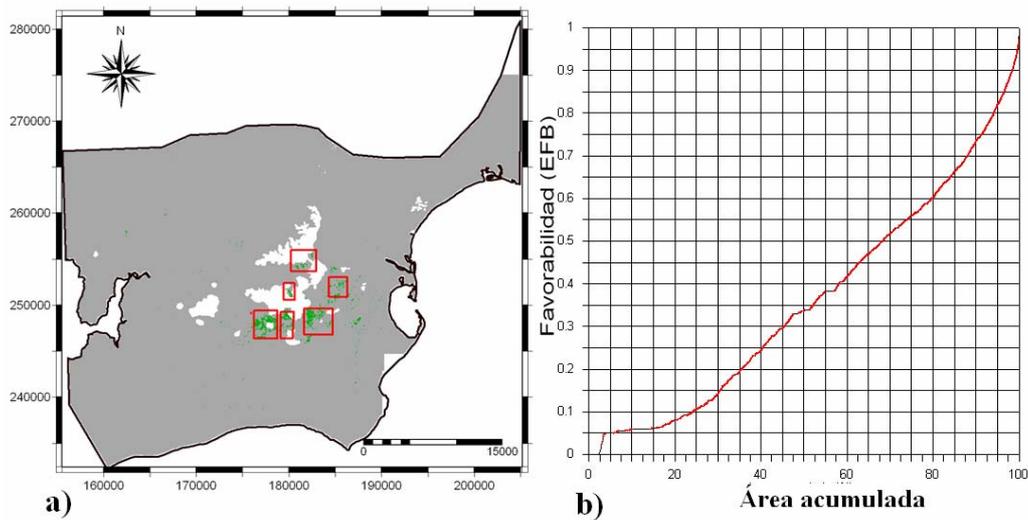


Figura 6. Mapa binario mostrando las nuevas áreas favorables obtenidas de la reclasificación del mapa EFB (a). Método gráfico para establecer el valor de corte (b).

La asociación espacial entre los mapas de evidencias y los yacimientos o manifestaciones conocidas, cuantificada con los métodos empleados en el estudio, permitió formalizar el modelo de yacimientos de arena para la construcción en la llanura La Fé-Cortés. Los depósitos de arena se relacionan con áreas que poseen las siguientes características:

- Un rango de cotas que varían entre 25-35 m por encima del nivel medio del mar.
- Sobre ellos se desarrollan suelos arenosos cuarcíticos típicos
- Pendientes entre  $0^\circ$  y  $0,5^\circ$
- Desnivel o contraste de cota de 2,5-5 m/Km<sup>2</sup>
- Escasa vegetación.
- Bajo contenido de arcilla.
- Se localizan en la parte oriental de la llanura, en franjas con orientación NE-SW, paralelas a la posición de la costa actual.

## CONCLUSIONES

El estudio de favorabilidad, en plataforma SIG, confirmó el alto potencial de la zona de estudio para hospedar nuevos yacimientos de grava y arena, especialmente la parte más oriental de la llanura. El mapa de potencial para agregados fue validado empleando trabajos de campo y contrastando los resultados de distintos modelos de integración. A pesar de los problemas con el modelo descriptivo, el empleo de métodos de integración basados en los datos resultó eficaz y se revelaron nuevas áreas perspectivas para la ocurrencia del tipo de depósito buscado. Las áreas reveladas ocupan aproximadamente el 5% de la superficie total, lo cual demuestra la capacidad selectiva del procedimiento empleado y reduce significativamente las áreas para investigaciones futuras. Los métodos de cuantificación de la asociación espacial entre las clases de los mapas de evidencias y los yacimientos conocidos, permitió valorar la importancia relativa de cada clase y formalizar el modelo de depósitos de grava y arena para la construcción. Para estudios de pronóstico de arena en la región se demostró la utilidad del empleo combinado de imágenes satelitales, información geológica, suelos y el relieve. Se demuestra que la presencia de vegetación, el tipo de suelo y el relieve constituyen los principales factores que controlan la localización de los depósitos de grava y arena en la región.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGTERBERG, F.P., BONHAM-CARTER, G.F. & WRIGHT, D.F. 1990. Statistical pattern integration for mineral exploration. In: Gaál, G. and Merriam, D.F. (Eds.). *Computer Applications in Resource*
- AN, P., MOON, W.M. Y BONHAM-CARTER, G.F. 1994. Uncertainty management in integration of exploration data using the belief function. *Nonrenewable Resources* 3(1) : 60-71.
- 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. 1993. Modelling sand and gravel deposits –initial strategy and preliminary examples. US geological survey report 93-200.
- BLISS, J. D. & PAGE, N.J. 1994. Modeling Surficial Sand and Gravel Deposits. *Nonrenewable Resources* 3(3) :237-249.
- BLISS, J. D., 1998, Aggregate modeling and assessment, en Bobrowsky, P.T., ed., *Aggregate Resources; a global perspective*: Rotterdam: A. A. Balkema Publishers, p. 255-274.
- BLISS, J. D. & MILLER, R. J. 1999. Evaluation of sand and gravel resources using selected engineering variables, U.S. GEOLOGICAL SURVEY, Open-File Report 99-127.
- BOBROWSKY, P. T & MANSON G. K. 1996. Modeling sand and gravel deposits and aggregate resource potential. *Aggregate resources - A Global perspective* p 231-253.
- BOBROWSKY, P.T., MASSEY, N.W.D. & MATHESON A. 1996a. Aggregate Resource Potential of the Prince George Area, B.C. Ministry of Employment and Investment, Open File 1996-24..
- BOBROWSKY, P.T., MASSEY, N.W.D., MATHESON A. & MATYSEK P.F. 1996b. British Columbia Aggregate Inventory Project; in *Geological Fieldwork 1995*, Grant, B. and Newell, J.M. , Editors, B.C. Ministry of Energy Mines and Petroleum Resources, Paper 1996-1, p. 295-297.
- BOBROWSKY, P.T., MASSEY, N.W.D. & MATHESON, A. 1998. Aggregate Resource Potential of the Okanagan Area (NTS 82E (west) and 82 (west), B.C. Ministry of Energy and Mines, Open File 1998-5 (digital data).
- BONHAM-CARTER, G.F., AGTERBERG, F.P. Y WRIGHT, D.F., 1988. Integration of geological datasets for gold exploration in Nova Scotia. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 54 (11) :1585-1592.
- BONHAM-CARTER, G.F., 1994. *Geographic Information Systems for Geoscientists, Modelling with GIS*, Pergamon, Ontario, 398 pp.
- BROWN, W., GROVES, D. & GEDEON, T. 2003. Use of fuzzy membership input layers to combine subjective geological knowledge and empirical data in a neural network method for mineral-potential mapping *Natural Resources Research* 12(3) :183-199.
- CARRANZA, E. J. M. 2002. *Geologically-constrained Mineral Potential Mapping*, Tesis doctoral, ITC Delft, The Netherlands, 474 pp.

- CARRANZA, E. J. M. & HALE, M., 2003, Evidential belief functions for geologically constrained mapping of gold potential, Baguio district, Philippines: *Ore Geol. Rev.* v. 22, nos. 1–2, p. 117– 132.
- CARRANZA, E. J. M., WOLDAI, T. & CHIKAMBWE, E. M. 2005. Application of data-driven evidential belief functions to prospectivity mapping for aquamarine-bearing pegmatites, Lundazi District, Zambia. *Natural Resources Research* 14 (1) :47-63.
- CHUNG, C.F. & Fabbri, A.G. 1993. The representation of geoscience information for data integration. *Nonrenewable Resources* 2 (2) :122-139.
- DEMPSTER, A. P. 1968. Generalization of Bayesian inference. *Jour. Royal Stat. Soc. Series B*, v. 30, p. 205–247.
- FREIRE, L. 1968. Informe de las investigaciones de la arena sílice del yacimiento Cortés para vidrio plano y vidrio óptico. ONRM. Ciudad de la Habana.
- FREIRE, L. & PELÁEZ, R. 1981. Informe Final Sobre la Búsqueda Regional de Arena Cuarzosa en el Yacimiento La Fe-Cortés. ONRM. Ciudad de la Habana.
- FREIRE, L. 1978. Informe final sobre la exploración detallada del yacimiento de arena cuarzosa Bailen. ONRM. Ciudad de la Habana.
- 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, D.V., ZURCHER, L., STANLEY, M., MARLOW, J. & PAN, G. 2003. A Comparative Analysis of Favorability Mappings by Weights of Evidence, Probabilistic Neural Networks, Discriminant Analysis, and Logistic Regression. *Natural Resources Research* 12(4) :241-255
- HERNÁNDEZ, J.; DÍAZ, A. & NAVEA, I. 1987. Informe de búsqueda orientativa y detallada de arena para la construcción al Oeste de Guane. ONRM. Ciudad de la Habana.
- 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.

- KNEPPER, D.H., LANGER, W.H., Y 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
- KUKLA, J. 1966. Informe sobre el yacimiento de arena para vidrio Santa Teresa y descripción breve de otros yacimientos de arena silíceo marinas en la provincia de Pinar del Río y la Habana. ONRM. Ciudad de la Habana.
- LANGER, W. H. & KNEPPER, D. H., JR. 1995. Geologic characterization of natural aggregate: a field geologist's guide to natural aggregate resource assessment: U. S. Geological Survey Open-File Report 95-582, 32 p.
- LEPIN, O.V. & ARIOSA J. D. 1986. Búsqueda, exploración y evaluación geólogo-económica de yacimientos minerales sólidos, Pueblo y Educación, La Habana, 348 p.
- LILLESAND, T. M. & KIERFER, R. W. 1994. Remote sensing and image interpretation. 3 ed, John Wiley & Song, EU, 750p.
- LINDSEY, D. A. 1997. An Introduction To Sand And Gravel Deposit Models, Front Range Urban Corridor. U.S. Geological Survey Open-File Report 97-81
- MASSEY, N.W.D., MATHESON A. & BOBROWSKY, P.T. 1998. Aggregate Resource Potential of the Nanaimo Area (parts of NTS 92B12, 92B13, 92C09, 92C16, 92F01, 92F02, 92F07, 92F08, 92G01); B.C. Ministry of Energy and Mines, Open File 1998-12 petroleum: Pergamon Press, Oxford, p. 1–21.
- NYKANEN, V. M. & OJALA, V. J. 2007. Spatial Analysis Techniques as Successful Mineral-Potential.—
- PIMENTEL, R. & DENIS VALLE, R. 2008. Informe de prospección geológica del yacimiento de arena de construcción Esbec-11, Sandino, Pinar del Río, ONRM. Ciudad de la Habana.
- PORWAL, A., 2006. Mineral Potential Mapping with Mathematical Geological Models, Tesis doctoral, University of Utrecht, The Netherlands, 289 pp.
- PORWAL, A., CARRANZA, E. J. M. & HALE, M. 2006. A Hybrid Fuzzy Weights-of-Evidence Model for Mineral Potential Mapping. *Natural Resources Research* 15(1) :1-13.

- 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.
- ROBINSON G. R., KATHERINE E. K. & RAINES G L. 2004. A GIS Analysis to Evaluate Areas Suitable for Crushed Stone Aggregate Quarries in New England, USA. *Natural Resources Research* 13 (3) :143-159.
- SINGER, D. A & COX, D. P. 1988. Application of mineral deposits model to resource assessment. US Geological survey Yearbook, Fiscal Year 1987.
- 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 counties, New Hampshire, with the surficial geologic map by Richard Goldsmith and D.M. Sutphin: U.S. Geological Survey Professional Paper 1627, 21 p.