
Recuperación de áreas

degradadas en canteras
de áridos utilizando sistemas
de información geográficos

Recovery of degraded areas in aggregate
quarries by means of geographic information systems

Alexis Montes de Oca Risco¹

Mayda Ulloa Carcassés¹

Angel Luis Silot Castañeda²

¹ Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa.

² Empresa de Ingeniería y Proyectos del Níquel (CEPRONIQUEL),
Moa (Holguín), Cuba.

amrisco23@gmail.com

mulloac@ismm.edu.cu

asilotc@ceproni.moa.minem.cu

Resumen

En los últimos años se ha incrementado la demanda de materiales de construcción, principalmente áridos. Esta situación contribuye al aumento de los niveles de contaminación generados por la ejecución de explotaciones mineras. Para enfrentar esta problemática se requiere realizar investigaciones que contribuyan a mitigar los daños ocasionados. Por ello, se realizó el presente trabajo que tuvo como objetivo recuperar áreas degradadas de las canteras de áridos con el empleo de los SIG. Se hace uso de los SIG para procesar e integrar los datos geocientíficos y ponderar convenientemente los planos de los indicadores ambientales para obtener, finalmente, el plano de degradación ambiental, que permite visualizar las áreas más degradadas por la minería. Como resultado, se validó el procedimiento en la cantera Los Guaos de la provincia Santiago de Cuba y se obtuvieron los posibles usos finales a que puede destinarse después de concluida la explotación.

Palabras clave: indicadores ambientales; planos temáticos; uso final; canteras de áridos.

Abstract

In recent years, the demand for construction materials, mainly aggregates, has increased. This situation contributes to the increase of the pollution levels generated by the execution of mining operations. In order to face this problem, it is necessary to carry out investigations that contribute to mitigate the damages caused. Therefore, the present work aims to recover the degraded areas of the aggregate quarries with the use of GIS. The GIS is used to process and integrate the geoscientific data and to conveniently weigh the maps of the environmental indicators to finally obtain the environmental degradation map, which allows us to visualize the areas most degraded by mining. As a result, the procedure was validated at the "Los Guaos" quarry in the province of Santiago de Cuba and its possible final uses after the exploitation is completed were obtained.

Key words: environmental indicators; thematic plans; end use; aggregate quarries.

1. Introducción

La minería, a través de los siglos, ha formado parte de la historia y del desarrollo económico de muchos países en el mundo. Sin embargo, muy notorios han sido los efectos sociales y ambientales que ha generado esta industria en detrimento de los diferentes ecosistemas relacionados con la misma.

En la actualidad, con el aumento de la capacidad humana para transformar el entorno natural, se ha originado un desequilibrio entre los deterioros ocasionados y la capacidad de recuperación del medio frente a los mismos. Pero, a la vez, no se puede prescindir de la minería porque es la actividad básica dedicada a la obtención de los geo-recursos para abastecer a la sociedad con las materias primas necesarias para mejorar su calidad de vida, su progreso y su destino (Carbonell, 2003).

Cuando la extracción de materiales se realiza sin una planeación de la explotación, ocasiona problemas que trascienden hasta después del abandono de la actividad. Éstos son muy graves debido a que los taludes quedan inestables, por lo que se producen deslizamientos, que a su vez pueden generar pérdidas de vidas humanas. Una explotación no planeada también puede originar otros problemas como: pérdida del suelo superficial, contaminación de las aguas superficiales, emisiones atmosféricas de polvo y la emisión de ruido (Bradshaw, 1993).

Actualmente, aumentan los niveles de contaminación generados por la ejecución de explotaciones mineras, pues se incrementa la demanda de materiales de construcción, principalmente áridos.

Para la recuperación de las áreas degradadas por la minería en diferentes investigaciones se han utilizado los indicadores ambien-

les que han adquirido relevancia en los últimos años, dada su capacidad de mostrar una imagen sintética de las condiciones ambientales del territorio. Su auge se ha desarrollado de forma paralela a los avances, acuerdos y retos ambientales a escala global.

En los momentos actuales, los estudios medioambientales adquieren paulatinamente una naturaleza más tecnocientífica, con el empleo de técnicas y métodos como es el caso de los sistemas de información geográficos (SIG). Sobre estos últimos, en el análisis de la literatura consultada no se encontró la existencia de un procedimiento que, sustentado en ellos, permita recuperar las áreas degradadas por la minería en las canteras de áridos.

Con vista a la solución del problema, el objetivo general de la investigación fue identificar las áreas degradadas de las canteras de áridos con miras a su recuperación utilizando SIG.

2. Materiales y métodos

2.1 Indicadores de degradación ambiental en canteras de áridos

En la medida de la aparición de los problemas ambientales y la creciente preocupación del hombre por medir y valorar los daños causados al ambiente, con el fin de establecer las medidas correctoras, la Comisión de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente en la Agenda 21, capítulo 40, señala la necesidad de crear indicadores de desarrollo sostenible (CNU-MAD, 1993).

Existen diferentes concepciones sobre la definición del concepto indicador, pero la más divulgada, aceptada y desarrollada a nivel internacional, ha sido la que propuso la Organización de Cooperación para el Desarrollo Económico (OECD, 1993).

Esta organización internacional considera que un indicador es un parámetro o valor resultante de otros parámetros, dirigido a proveer información y describir el estado de un fenómeno con un significado más amplio que el directamente asociado con la configuración del parámetro.

A partir del análisis realizado a las diferentes fuentes bibliográficas estudiadas, se estableció que en el proceso de identificación y selección de los indicadores de degradación ambiental en las áreas afectadas por la explotación de canteras de áridos, la metodología a emplear debe ser la consulta a expertos a través del Método Delphi.

Este método pretende obtener una visión colectiva de expertos sobre un tema a partir de rondas repetidas de preguntas. Es un método con el que se puede obtener y depurar los juicios de grupo. Su utilización es verdaderamente efectiva a la hora de recoger información de un grupo que es considerado como un conjunto único para analizar y resolver un problema específico (Linstone y Turoff, 1975). La aplicación de este método permitió la identificación de los indicadores a través de los pasos siguientes:

- Elaboración del cuestionario
- Determinación del número de expertos
- Selección de los expertos
- Realización de las rondas para obtener el consenso de los expertos
- Evaluación de los resultados a partir de la prueba de hipótesis.

2.2 Elaboración del cuestionario

Para determinar los indicadores que serían sometidos a consideración de los expertos, se realizaron trabajos de campo en 40 canteras de áridos, además de consultas a los especia-

listas de medio ambiente de cada una de estas canteras.

Finalmente, se identificaron las características más representativas y comunes en los diferentes escenarios mineros estudiados, del medio geológico, ecológico y minero.

2.3 Determinación del número de expertos

Una vez elaborado el listado de indicadores, se realizó la selección de los expertos a partir del cálculo del número de expertos (n), tomado de Legrá y Silva (2011):

$$n = p (1 - p) \left(\frac{Z_{1-\frac{\alpha}{2}}}{d} \right)^2 \quad (1)$$

Donde:

d : error admisible y que algunos autores recomiendan entre 0,14 y 0,5 (Martin, 2006)

p : proporción o probabilidad de fallo (valor entre 0 y 1)

$Z_{1-\frac{\alpha}{2}}$: constante cuyo valor está asociado con el nivel de confianza seleccionado.

Para un nivel de confianza del 95%, se toma $Z = 1,96$ (Martin, 2006)

Tomando: $d = 0,25$ y $p = 0,2$, se obtiene, al sustituir en la expresión (1) que:

$n = 9,83$, por lo que se necesitan 10 expertos.

2.4 Selección de los expertos

Para determinar el coeficiente de competencia de los 14 expertos seleccionados preliminarmente, se envió el cuestionario elaborado y se calculó su coeficiente de competencia.

Finalmente, fueron escogidos 10 expertos, según su grado de competitividad y se analizaron sus características técnico-profesionales. Como resultado se obtuvo lo siguiente: expertos con un alto nivel de competitividad: 71,43% y expertos con un nivel medio de competitividad: 28,57%

Por tal razón, se seleccionaron 10 expertos con un coeficiente de competitividad promedio de $K_c \geq 0,81$.

2.5 Realización de las rondas para obtener el consenso de los expertos

Las encuestas confeccionadas se enviaron a los expertos para obtener criterios cualitativos en una primera ronda y cuantitativos en las rondas dos y tres, lo que permite obtener una unidad de criterios acerca de los aspectos que mayor incidencia tienen en los procesos analizados.

2.5.1 Primera ronda para obtener un consenso de criterios

En esta ronda se somete al criterio de los expertos el cuestionario elaborado, para seleccionar los indicadores más importantes que influyen en la degradación de canteras. Se analizaron los indicadores propuestos y fueron adicionados tres, por sugerencia de los expertos: clima, litología y características del recurso minero. Finalmente, se aceptaron 10 indicadores (relieve del terreno, pendiente del terreno, erosión del suelo, fertilidad del suelo, calidad del agua, calidad del paisaje, presencia de flora y fauna, clima, litología y característica del recurso minero) que pasaron a la siguiente ronda.

2.5.2 Segunda ronda para determinar los indicadores que influyen en la degradación

En esta ronda, primeramente, se obtuvieron las tablas de frecuencia absoluta, después, la tabla de frecuencia acumulada y, más adelante, la tabla del inverso de la frecuencia absoluta acumulada.

Las categorías evaluativas empleadas fueron, en orden descendente: muy adecuado (MA), bastante adecuado (BA), adecuado (A), poco adecuado (PA) e inadecuado (I). Se seleccionaron siete indicadores (relieve del terreno, pendiente del terreno, erosión del suelo, fertilidad del suelo, calidad del agua, calidad del paisaje y presencia de flora y fauna) que pasaron a la tercera ronda.

Se obtuvo coincidencia entre los criterios seleccionados por los expertos con los indicadores previamente considerados por el autor para determinar la degradación en canteras de áridos.

En esta ronda se sometieron 10 indicadores al proceso de selección y se eliminaron los que recibieron menor apoyo de los expertos.

2.5.3 Tercera ronda para obtener la influencia de cada indicador seleccionado

Se sometieron los siete indicadores al criterio de los 10 expertos, los que se ordenaron desde 1 (mayor influencia) a 7 (menor influencia).

Con las evaluaciones realizadas por cada experto, se determinó el grado de concordancia a través del coeficiente de Kendall (K), por la fórmula 2, tomado de Martin (2006), cuyo valor oscila entre 0 y 1. Se consideró que cuando $K > 0,7$ existe elevada concordancia entre los expertos y cuando $K < 0,4$ no existe concordancia.

$$K = \frac{12 \sum_{j=1}^P (S_j - S_{med})^2}{M^2 (P^3 - P)} \quad (2)$$

Dónde:

P : número de criterios que se valoran,

M : cantidad de expertos encuestados,

S_j : suma de los valores asignados por los expertos a cada criterio j ,

Smed: valor medio de (S_j) con respecto al número de criterio P .

Del procesamiento de las encuestas se obtuvo el siguiente valor del coeficiente de Kendall: $K = 0,73$ lo que confirma la existencia de elevada concordancia entre los expertos.

2.6 Evaluación de los resultados a partir de la prueba de hipótesis

Finalmente, se realizó la prueba de significación para determinar la concordancia entre los criterios expresados por los expertos. Al respecto, se definieron las siguientes hipótesis con un nivel de significación de 0,05:

De la tercera ronda se obtuvo que $Ken = 0,73$, lo que permite calcular

$$\chi^2 \text{ calculada} = M \cdot (P-1) \cdot K \quad (3)$$

$$\chi^2 \text{ calculada} = 43,8$$

$$\chi^2 (0,05, 6) = 12,591 6$$

Puesto que $\chi^2 \text{ calculada} > \chi^2 \text{ tabulada}$, se aceptó la hipótesis alternativa, por lo que se puede afirmar que existe concordancia entre los expertos.

Los expertos determinaron que los indicadores que permiten evaluar la degradación en canteras de áridos son los siguientes:

- a) Relieve del terreno
- b) Calidad del paisaje
- c) Calidad del agua
- d) Pendiente del terreno
- e) Erosión del suelo
- f) Fertilidad del suelo
- g) Presencia de flora y fauna

2.7 Determinación del peso de los indicadores

El algoritmo definido para el cálculo y obtención del plano de degradación ambiental requiere la ponderación de los diferentes indi-

cadores involucrados, por lo tanto se eligió la técnica estadística de Evaluación Multicriterio (EMC) para la determinación objetiva de los pesos asignados a los criterios que intervienen en la degradación de canteras.

La importancia de este método radica en que, luego de la asignación de los pesos, otorga una medida global de consistencia a la matriz obtenida y permite valorar la relación de los criterios entre sí.

Existen diferentes técnicas dentro de la EMC para otorgar a cada criterio el valor que se merece. La selección de una técnica u otra para la estimación de los pesos de los criterios, depende del tipo de problema que se tenga y del resultado que el centro decisor quiera obtener.

Entre éstos, el método AHP (*Analytic Hierarchy Process* - Proceso de Jerarquía Analítica) es un método que descompone en sus componentes una situación compleja y no estructurada, los ordena en una jerarquía, realiza comparaciones binarias (dentro del mismo nivel jerárquico) y atribuye valores numéricos a juicios de valor subjetivos respecto a la importancia relativa de cada variable (tanto en el nivel jerárquico de los criterios, como en el nivel jerárquico de las alternativas).

Es un método bastante intuitivo en su aplicación, difícilmente manipulable y probablemente sea el método más difundido en las investigaciones medio ambientales (Bera-mendi, 2013). Se basa en tres pilares o pasos fundamentales para su realización:

1. Generación de la matriz de comparaciones: al compararse los diferentes criterios entre sí, en la diagonal principal solo puede aparecer el valor 1. Mientras que las demás casillas de la matriz se van rellenando según la importancia de un criterio

respecto al otro, con el uso de la escala de preferencias de comparación por pares de Saaty (1990).

2. Cálculo de los pesos: se suman los valores en cada columna de la matriz y se divide cada elemento por el total de su columna, con lo que queda normalizado cada uno de los elementos.
3. Finalmente, se calcula el promedio de cada fila de la matriz normalizada y los valores medios serán los pesos que se asignarán a cada criterio.
4. Estimación de la consistencia: se calcula el *ratio* de consistencia. Si tiene un valor inferior al 10 %, el nivel de consistencia se considera razonable.

La estimación de la consistencia se realiza para ver si ha habido alguna incongruencia a la hora de valorar la importancia entre los pares de criterios.

Para el cálculo del índice de consistencia (CI), se multiplica cada columna por su peso y se suman los valores respectivos de las filas y se obtiene el vector. Posteriormente, se dividen los elementos del vector obtenido por el correspondiente peso de cada criterio y se realiza la media de los valores calculados anteriormente, esta media se denomina $\lambda_{\max}$ y n el número de criterios a comparar.

Por lo tanto, para este caso con $n = 7$ criterios, se tendrá una $RI = 1,35$ y un *ratio* de consistencia de 0,08 (8%).

El valor obtenido del *ratio* de consistencia demuestra que no existe incongruencia en el otorgamiento de importancia en la matriz de comparación por pares.

Una vez obtenido el peso de los indicadores (**Cuadro 1**) se procedió a caracterizarlos y a proponer los criterios para su valoración.

Cuadro 1 Peso de los indicadores

Indicadores	Peso de los indicadores
Relieve del terreno	0,18
Pendiente del terreno	0,05
Fertilidad del suelo	0,08
Presencia de flora y fauna	0,32
Calidad del agua	0,22
Calidad del paisaje	0,11
Erosión del suelo	0,04

2.8 Criterios de valoración del sistema de indicadores para las canteras

La medición de los criterios puede realizarse por medio de cuatro escalas de medición, dos de las escalas miden criterios cualitativos (nominal y ordinal) y las otras dos miden variables cuantitativas (de intervalo y de razón), (Therese, 1997).

Debido a las características y ventajas que presenta la escala ordinal se optó por ella, ya que la misma establece preferencias, no mide magnitudes, es de fácil diseño, de fácil comprensión, sin sesgos en su redacción y no fatiga si hay que jerarquizar pocos conceptos (Sabino, 1992).

La escala de evaluación de los criterios se obtuvo a partir de reglas del método Delphi; se tomó una escala variable entre 1 y 3, siendo 3 el valor que más influye en la degradación y 1 el que menos influye (**Cuadro 2**).

2.9 Determinación del tamaño de la muestra

Una vez seleccionados los indicadores y calculados los pesos se procede a obtener la base de datos en el campo, la cual constituye una etapa relevante, debido a su carácter operacional, ya que permite el adecuado funcionamiento de los SIG.

Cuadro 2 Criterios de valoración para los indicadores seleccionados

Indicador	Valor	Criterios de valoración
Relieve del terreno	1	Relieve plano
	2	Ligeramente ondulado
	3	Relieve abrupto
Calidad del paisaje	1	Bien preservada
	2	Deteriorada por acciones humanas
	3	Lugar destruido
Calidad del agua	1	Agua no contaminada
	2	Agua levemente contaminada
	3	Agua muy contaminada
Pendiente del terreno	1	0-15° plano a ligeramente plano
	2	15-35° inclinado
	3	> 35° escarpado
Erosión del suelo	1	Sin erosión
	2	Moderadamente erosionado
	3	Severa
Fertilidad del suelo	1	Alta
	2	Media
	3	Baja
Presencia de flora y fauna	1	Alto (se presenta la totalidad de las especies existentes en la región)
	2	Medio (se presentan hasta el 50 % de las especies existentes en la región)
	3	Bajo (no aparecen ninguna de las especies presentes en la región)

Para la obtención de la base de datos para confeccionar los planos, se determinan los puntos a través del método estadístico aleatorio simple.

Este método estadístico da la probabilidad a cada uno de los miembros de una población a ser elegidos y permite obtener conclusiones en la muestra e inferir lo que pudiera ocurrir, a partir de ésta, en la población, con un elevado grado de pertinencia. Estadísticamente permite inferir a la población los resultados obtenidos en la muestra (Devore, 2000), (Fórmula 4 y 5).

La determinación del tamaño de la muestra se realiza a través de la siguiente fórmula:

$$n_o = \left(\frac{z}{a} \right)^2 * p * q \quad (4)$$

$$n = \frac{n_o}{1 + \frac{n_o}{N}} \quad (5)$$

Dónde:

n_o : cantidad teórica de elementos de la muestra

n : cantidad real de elementos de la muestra a partir de la población asumida

N : número total de elementos que conforman la población

z : valor estandarizado en función del grado de confiabilidad de la muestra calculada

ε : error asumido en el cálculo (se toma entre 0,05 y 0,1)

q : probabilidad de la población que no presenta las características (se toma entre 0,01 y 0,20)

p : probabilidad de la población que presenta las características. Como $p + q = 1$ (Probabilidad máxima) $\rightarrow p = 1 - q$ (6)

2.10 Determinación del plano de degradación ambiental y clasificación de las áreas degradadas

Los datos obtenidos para construir los planos temáticos estuvieron representados por: relieve y pendiente del terreno, calidad del agua y del paisaje, erosión del suelo y presencia de flora y fauna. La forma de obtención de los datos en el campo fue por medio de uso del GPS (Sistema de Posicionamiento Global) como recurso para complementar la localización de los puntos mostrados en el plano de la cantera.

Después de obtener la base de datos, esta información se introduce en el programa *ArcGis* y se obtienen los planos temáticos para cada uno de los indicadores propuestos en formato vectorial, después se procede a la conversión en formato raster con tamaño de celda de 2 x 2 m. Finalmente, para la generación del plano de degradación ambiental del área, se utilizó el análisis multicriterio, a través del método denominado 'sumatoria lineal ponderada' (Saaty, 1990). Este proceso sistemático permite la combinación de varios factores a través de una suma lineal ponderada, multiplicando cada factor por su peso y sumando los resultados obtenidos de manera lineal (Malczewski, 2006), (Fórmula 7).

La metodología aplicada en la investigación se resume en la **Figura 1**, en la que se presenta la estructura del SIG implementado y el orden lógico de los procedimientos para la obtención del plano final de degradación ambiental.

$$r_i = \sum_{j=1}^n w_j * v_{ij} \quad (7)$$

Dónde:

r_i : nivel de adecuación de la alternativa i

w_j : peso del criterio j

v_{ij} : valor ponderado de la alternativa i en el criterio j

2.11 Determinación del uso final del suelo para el área

Las operaciones extractivas constituyen un uso temporal de los terrenos, con períodos de ocupación que con frecuencia no superan los 20 ó 30 años, salvo casos especiales como son los grandes yacimientos metálicos.

El uso potencial se define como la capacidad natural que poseen las tierras para producir o mantener una cobertura vegetal. Esta capacidad natural se puede ver limitada por la presencia de procesos erosivos severos, por la profundidad efectiva, el grado de pendiente, las características químicas y físicas de cada suelo, niveles freáticos fluctuantes, entre otras (Hoyos, 2012).

Según la práctica minera nacional e internacional, los usos posibles a que pueden destinarse los terrenos afectados por las explotaciones mineras pueden dividirse en: urbanístico e industrial, recreativo, agrícola, forestal, conservación de la naturaleza y refugio ecológico, depósitos de agua y abastecimiento a poblaciones y vertederos de estériles y basuras.

Para la determinación del uso futuro de las áreas recuperadas se elaboró la matriz de compatibilidad de uso, en función de la degradación ambiental.

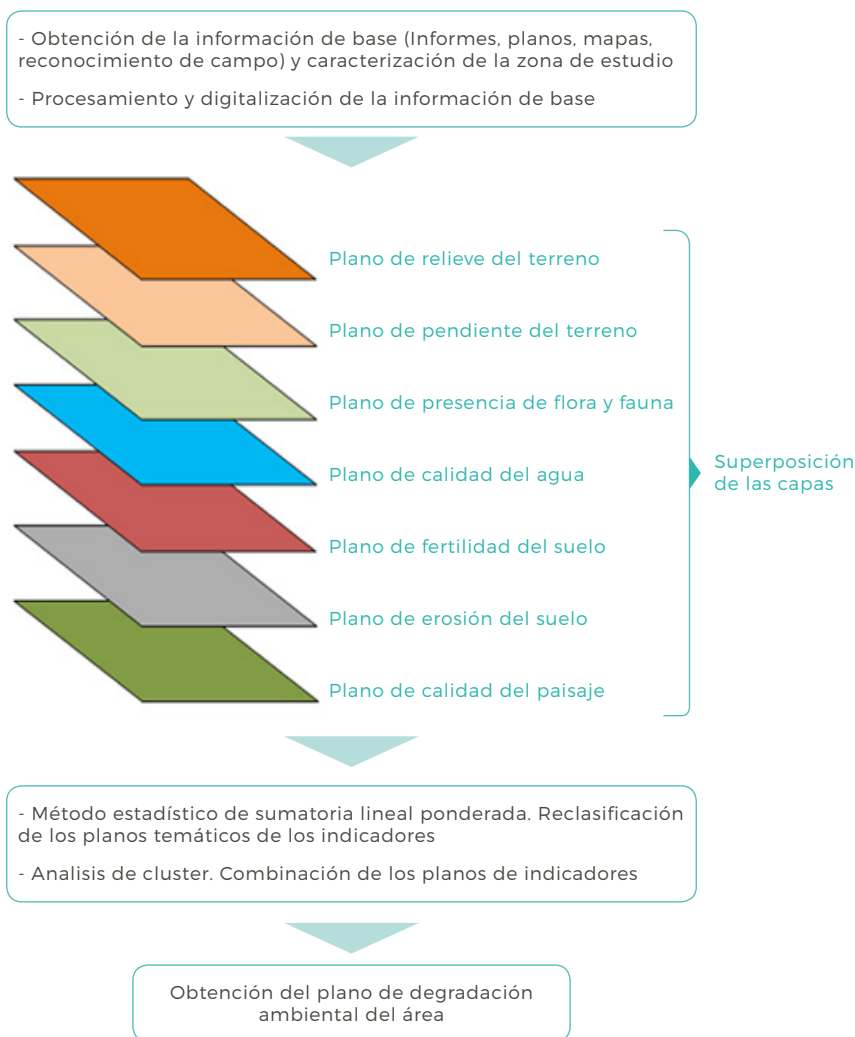


Figura 1 Metodología empleada para la obtención del plano de degradación ambiental

Para la obtención del uso final de la cantera se programó en Excel (**Cuadro 3**) la tabla de compatibilidad que permite obtener el resultado, agregando la información de la base de datos obtenida en el campo y que también está registrada en el plano de degradación ambiental de la cantera.

3. Resultados

3.1 Elección y justificación de la cantera Los Guaos

El establecimiento de indicadores para la determinación de la degradación de áreas degradadas en canteras requiere de su implementación, para lo cual se selecciona un caso de estudio, considerando el nivel de representatividad de sus características minero ambientales.

Cuadro 3 Determinación del uso final del suelo en función de la degradación ambiental

	Flora y fauna	Relieve	Paisaje	Fertilidad	Pendiente	Agua	Erosión
Urbanístico e industrial	1,2,3	1,2	1,2	1,2,3	1,2	1	1,2
Recreativo	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
Agrícola	1,2,3	1,2	1,2	1,2	1	1	1
Forestal	1,2,3	1,2	1,2,3	1,2	1,2	1	1
Conservación	1,2,3	1,2	1,2	1,2,3	1,2,3	1	1,2
Depósito de agua	1,2,3	1,2	1,2,3	1,2,3	1,2	1,2	1,2
Vertedero	1,2,3	1,2	1,2,3	1,2,3	1,2	1,2	1,2

Nivel de los indicadores de impacto							Posibles usos del área
Flora y fauna	Relieve	Paisaje	Fertilidad	Pendiente	Agua	Erosión	
1	1	1	1	1	1	1	Urbanístico e industrial-Recreativo-Agrícola-Forestal-Conservación-Depósito de agua-Vertedero

Para la elección del caso de estudio se tuvo en cuenta que en Cuba existen más de 100 canteras de áridos, de ellas la mayor parte (40) en el Oriente, y en esta zona, la provincia con más yacimientos concesionados es Santiago de Cuba.

Partiendo de las investigaciones realizadas en las diferentes canteras pertenecientes a la Empresa de Materiales de Construcción Santiago de Cuba, se seleccionó la cantera Los Guaos como caso de estudio para aplicar el procedimiento elaborado, debido a su situación ambiental relacionada con su explotación.

También se tuvo en cuenta su importancia económica, social y ambiental; el significado que tiene para los habitantes del área y sus posibilidades para darle otro uso futuro.

- ### 3.2 Ubicación y caracterización de la cantera Los Guaos

 - Ubicación y caracterización del yacimiento Los Guaos**

El yacimiento se encuentra ubicado en la provincia de Santiago de Cuba, a 5 km al oeste de la ciudad (Figura 2). El área se encuentra en explotación desde enero de 1972 y sus plantas constituyen las principales abastecedoras de áridos en la provincia Santiago de Cuba (Parra, 2003).
 - Relieve**

El relieve en la región se puede clasificar como semi-montañoso y su origen se relaciona con procesos tectónicos y erosivos. Al este del yacimiento se presentan las cotas más altas, con valores de 231 m sobre el nivel del mar. Las cotas mínimas son de 50 m, esto es apreciable al oeste donde el relieve es más ondulado. Hacia el este las elevaciones pre-

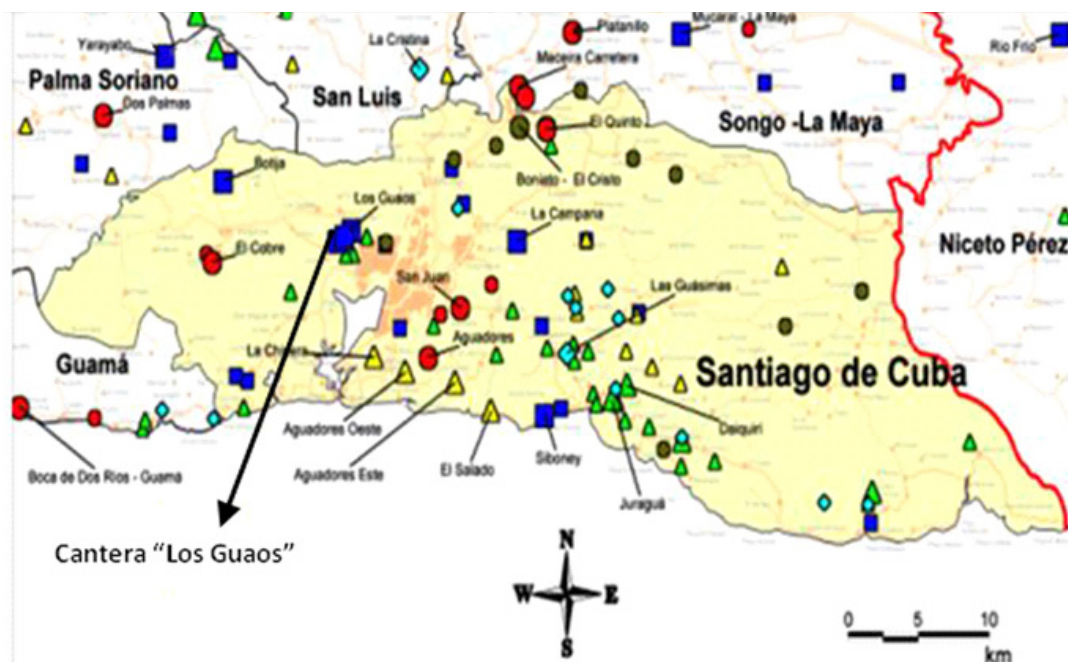


Figura 2 Ubicación de la cantera Los Guaos

sentan pendientes suaves hacia el norte y abrupta hacia el sur (Pérez, 2015).

• Clima

El clima es tropical y seco; la temperatura media más alta en el periodo es de 31 °C, en agosto, enero y febrero la media más baja es de 26 °C. La humedad relativa oscila entre un 70 y un 75 %. Los vientos predominantes durante el día son las brisas marinas de hasta 12 km/h. La precipitación media anual oscila entre los 800 a 1.000 mm de lluvia (Pérez, 2015).

• Hidrografía

La red hidrográfica la forman los ríos Guaos y Gascón y algunos arroyos. Estos ríos tienen una dirección norte-sur y son de carácter intermitente en época de estiaje. El Gascón pasa al este del yacimiento, nace al norte del área en las inmediaciones de la sierra Puerto Pelado, atraviesa en su recorrido rocas de la

formación ‘El Cobre’, y desemboca en la bahía de Santiago. El río Guaos nace al norte atraviesa el yacimiento y desemboca en la bahía de Santiago (Pérez, 2015).

• Geología del yacimiento

En el área donde se ubica el yacimiento afloran las rocas del Grupo El Cobre, representado por diferentes tipos de rocas vulcanógenas y vulcanógeno-sedimentarias. Predominan: tobas, lavas de composición andesítica, andesítica-dacítica y dacítica. Con estas rocas se intercalan tufitas y calizas, además, se asocian con este complejo vulcanógeno-sedimentario cuerpos hipabisales y diques de diversa composición.

• Descripción del medio biológico

En la zona en que se encuentra enmarcado el yacimiento Los Guaos se puede encontrar una gran variedad de plantas y animales que

conforman la diversidad biológica del yacimiento. Entre la variedad de la flora se puede mencionar el mango (*Mangifera indica* L.), el marabú (*Dichrostachys cinerea*), el almendro (*Terminalia catappa* L.), el guao (*Comocladia dentata* Jacq.), el palo bobo (*Cochlospermum vitifolium*), el almendrillo (*Reynosaia revoluta*) y la malagueta (*Anonáceas*). Entre los ejemplares de la fauna se puede encontrar la rana toro (*Lithobates catesbeianus*), el sapo común (*Bufo bufo*), la lagartija verde (*Teius teyou*), el majá de Santamaría (*Epicrates angulifer*), el jubito (*Arrhyton vittatum vittatum*), la jutía conga (*Capromys pilorides pilorides*), la bayoya (*Leiocephalus stictigaster*), el zunzún (*Chlorostilbon ricordii*), el bobito (*Contopus caribaeus*), el negrito (*Melopyrrha nigra*), el totí (*Dives atrovioleaceus*), la tojosa (*Columbina passerina*), el aura tiñosa (*Cathartes aura*), el sinsonte (*Toxostoma rufum*), el murciélago (*Chiroptera*), (Montes de Oca, 2013).

3.3 Determinación de plano de degradación ambiental y clasificación de las áreas degradadas

3.3.1 Determinación de la cantidad de muestras en el terreno

Para la determinación de la cantidad de muestras en el terreno, se aplicó el método de muestreo estadístico aleatorio simple a través de los siguientes pasos:

1. Determinación del grado de confiabilidad. Se asumió un grado de confiabilidad de un 95 %, por lo tanto: $z = 1,96$.
2. Determinación del valor del error asumido en el cálculo. Debido a que el tamaño de la población es igual a 20, se está trabajando con valores de N mayores de 10, por lo que se asume un error de 5 %, entonces: $\varepsilon = 0,05$.

3. Determinación del valor de la probabilidad que tiene la muestra de no poseer las mismas cualidades de la población. Como el tamaño de la población es 20, aplicando la tabla para los valores de q , se asume trabajar con el 1 %, luego: $q = 0,01$.
4. Cálculo de la probabilidad que tiene la muestra de poseer las mismas cualidades de la población. Obtenido el valor de q , se puede determinar p mediante la expresión: $p = 1 - q$, luego $p = 0,99$.
5. Cálculo del tamaño de la muestra teórica. En la expresión (4) se sustituyen los valores de cada variable para determinar el valor de n_0 y se obtiene que $n_0 = 15,21$.
6. Cálculo del tamaño de la muestra real. En la expresión (5) se sustituyen los valores de cada variable para determinar el valor de n y se obtiene que $n = 9$. Teniendo en cuenta la cantidad de puntos del plano, al aplicar el método estadístico se obtuvo un tamaño de la muestra de 432 puntos para confeccionar el plano de cada uno de los indicadores propuestos.

3.3.2 Determinación de la cantidad de muestras en las aguas superficiales

La cantidad de muestras se determinó según la Norma Técnica de Brasil 9897 (*Planejamento de Amostragem de Efluentes líquidos e Corpos Receptores*) que plantea que el número de muestras depende del volumen de agua de la zona. La cantera Los Guaos presenta un volumen superior a 10.000 m³ (Pérez, 2015), por lo que se tomaron 51 muestras de aguas superficiales.

Los análisis físico-químicos de las muestras de agua (pH, turbidez, sólidos sedimentables, coliformes y aceites y grasas) se efectuaron en Laboratorios de Higiene, Epide-

miología y Microbiología y la temperatura se determinó in situ con un medidor digital de oxígeno *Toa Electronics Ltd.*

3.4 Obtención del plano de degradación ambiental

Determinados los puntos de muestreo y los indicadores de degradación ambiental se procede a elaborar los planos de cada uno de los indicadores propuestos a través de la metodología propuesta en la **Figura 1**.

Los datos se obtienen por medio de uso del GPS como recurso para complementar la localización de los puntos en el plano de la cantera.

La base de datos se introduce en el programa *ArcGis* y se obtienen los planos temáticos para cada uno de los indicadores (**Figuras 3a-g**) y, finalmente, el plano de degradación ambiental (**Figura 3h**), en la escala de 1:2.000.

3.5 Clasificación de las áreas degradadas

La clasificación de las áreas se obtuvo a través del plano de degradación ambiental (**Figura 3h**), el cual se clasificó en tres áreas: degradación alta con 173.851,99 m², degradación media con 84.086,19 m² y degradación baja con 142.075,80 m².

Del área total de 400.013,98 m², el 43,5 % pertenece a degradación alta.

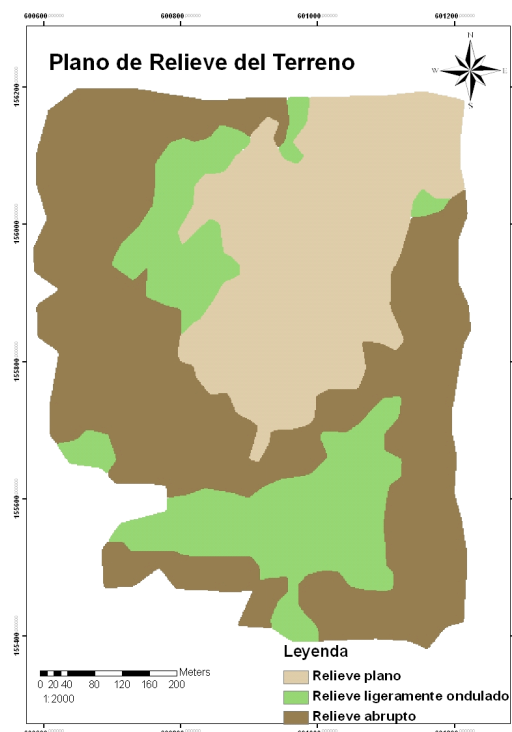


Figura 3a Plano de relieve del terreno

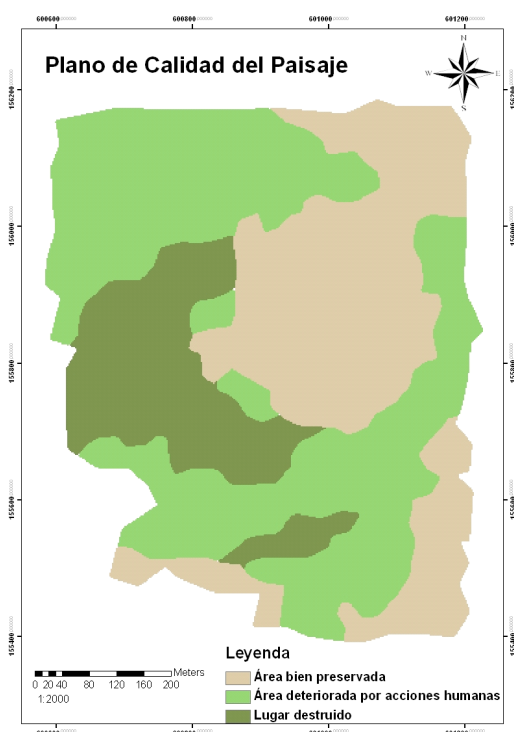


Figura 3b Plano de calidad del paisaje

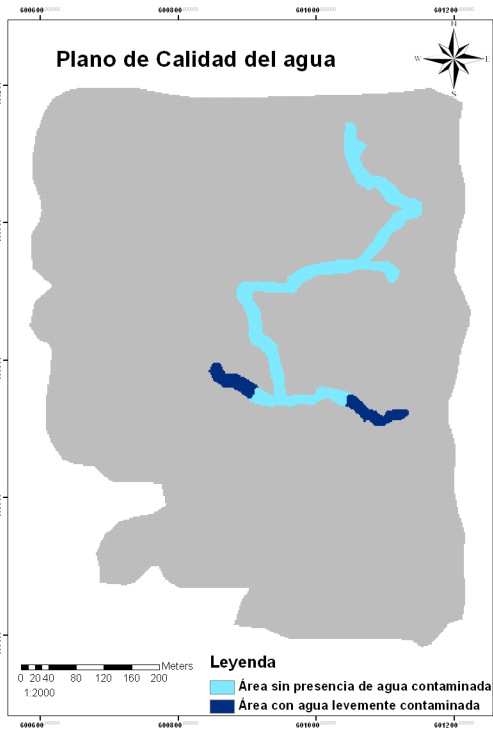


Figura 3c Plano de calidad del agua

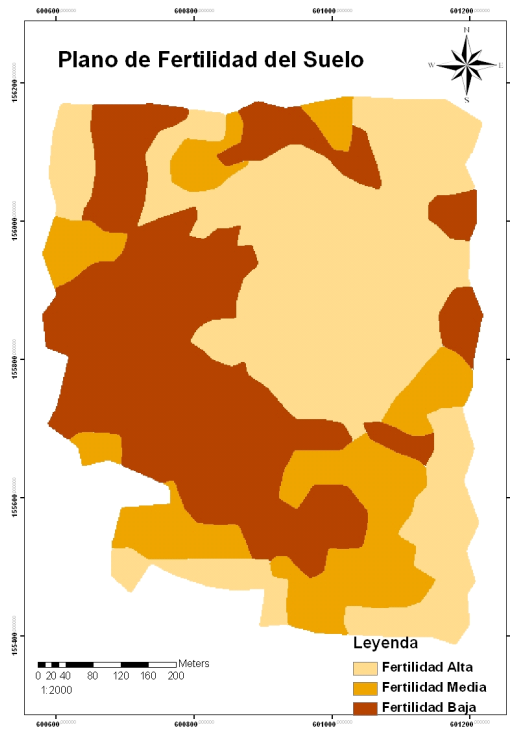


Figura 3d Plano de fertilidad del suelo

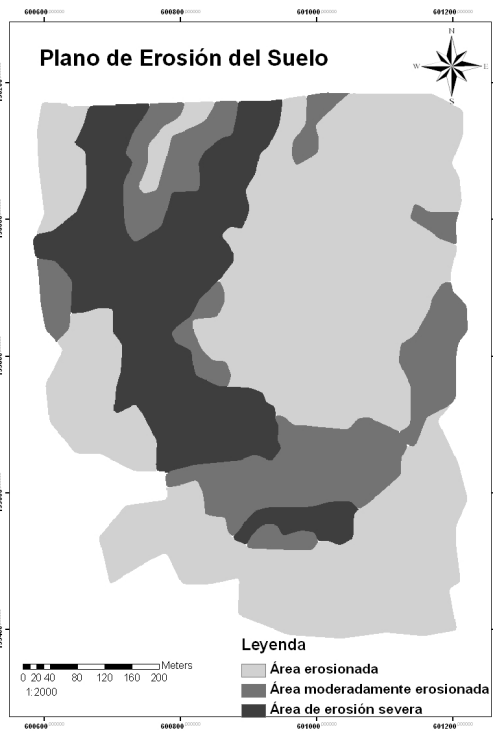


Figura 3e Plano de erosión del suelo



Figura 3f Plano de pendiente del terreno

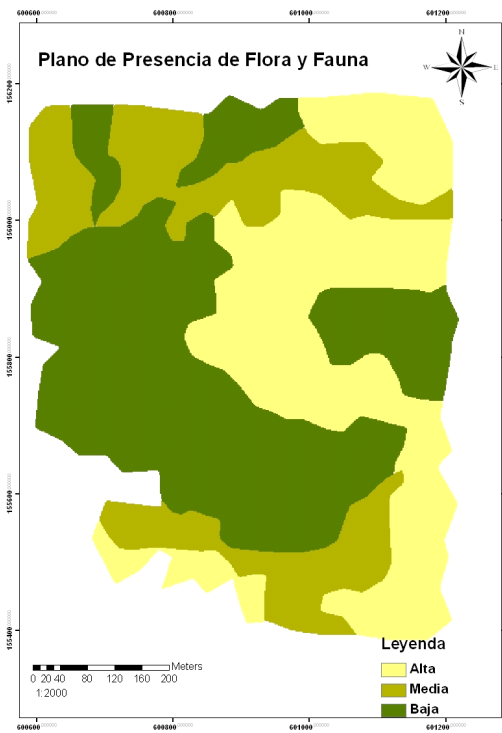


Figura 3g Plano de presencia de flora y fauna

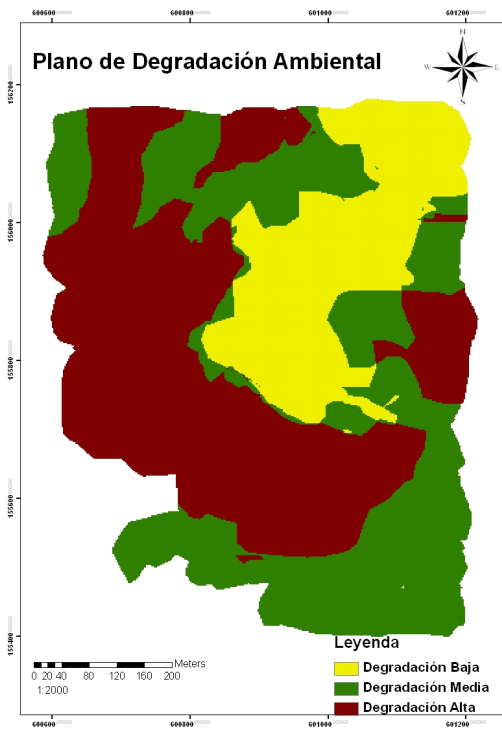


Figura 3h Plano de degradación ambiental

3.6 Determinación del uso final del suelo para el área

Con la aplicación del Excel confeccionado (Cuadro 3), se determinó el uso final para el suelo para la cantera Los Guaos (Cuadro 4). La aplicación del procedimiento para la recuperación de áreas degradadas en la cantera Los Guaos permitió obtener las variantes

de usos: recreativo, urbanístico e industrial, recreativo, conservación, depósito de agua y vertedero; los cuales representan una solución viable a una problemática del territorio. La selección de cualquiera de las variantes de uso final compatibles estará en dependencia de las necesidades de los actores responsables (planificación física, CITMA y la comunidad).

Cuadro 4 Determinación del uso final del suelo para la cantera Los Guaos

Nivel de los indicadores de degradación							Posibles usos del área
Presencia de flora y fauna	Relieve del terreno	Calidad del paisaje	Fertilidad del suelo	Pendiente del terreno	Calidad del agua	Erosión del suelo	
2	2	2	2	2	1	2	Urbanístico e industrial - Recreativo - Depósito de agua - Vertedero

4. Conclusiones

1. A través del criterio de expertos se determinaron los indicadores de degradación ambiental para canteras de áridos: relieve del terreno, pendiente del terreno, fertilidad del suelo, presencia de flora y fauna, calidad del agua, calidad del paisaje, erosión del suelo y el plano de degradación ambiental.
2. Con la aplicación de los SIG se obtuvieron los planos de cada uno de los indicadores ambientales del área y el plano de degradación ambiental, lo que permitió obtener el nivel de degradación de las áreas mineras y clasificar por tipos las áreas degradadas en la cantera Los Guaos.
3. La aplicación del procedimiento para la recuperación de áreas degradadas en la

cantera Los Guaos permitió obtener las variantes de usos: recreativo, urbanístico e industrial, recreativo, conservación, depósito de agua y vertedero, los cuales representan una solución viable a una problemática del territorio.

4. La implementación del procedimiento en la cantera Los Guaos demostró la aplicabilidad del mismo en las zonas afectadas por la actividad minera.

5. Nota

El término ‘árido’ engloba a un conjunto de materiales granulares inertes comúnmente conocidos con terminologías como arenas, gravas, gravillas, balasto, etc. (Villanueva, 2008)

6. Referencias citadas

- BERAMENDI, B. 2013. *Criterios económicos y medioambientales de la gestión de rutas transpirenaicas en el transporte de mercancías a través de Guipúzcoa*. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación. Universidad de Pamplona. Norte de Santander. Colombia. Tesis de Grado
- BRADSHAW, A. 1993. “Restoration of mined Lands-Using Natural Processes”. *Ecological Engineering*, 8(4): 255-269.
- CARBONELL, F. 2003. *Evaluación del impacto ambiental que se genera durante la explotación del yacimiento la Yaya y en el proceso industrial de la cantera*. Departamento de Geología. Universidad de Pinar del Río. Pinar del Río, Cuba. Tesis de Maestría.
- COMISIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA EL MEDIO AMBIENTE (CNUMAD). 1993. *Agenda 21*. Disponible en: [http://www.un.org/esa/sustdev/documents/agenda 21](http://www.un.org/esa/sustdev/documents/agenda%2021/). [Consulta: junio, 2015].
- DEVORE, J. 2000. *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias*. Thomson Editores. California, USA.
- HOYOS, R. 2012. *Instructivo sobre el uso potencial y sostenible del recurso suelo como apoyo a una estrategia de educación ambiental a los productores de piña ananas comosus (L.) merr, en el corregimiento Los Alpes, municipio de*

- Dagua, Valle del Cauca*. Departamento de Ciencias Ambientales. Universidad Autónoma de Occidente. Santiago de Cali, Colombia. Tesis de Grado.
- LEGRÁ, L. y D. SILVA. 2011. *La investigación científica, Conceptos y Reflexiones*. Félix Varela. Habana, Cuba.
- LINSTONE, H. & M. TUROFF. 1975. *The Delphi method: Techniques and applications*. Reading, MA. Addison Wesley Publishing Company. USA.
- MARTIN, W. 2006. *Metodología de la investigación*. Universidad de Cienfuegos. Cienfuegos, Cuba.
- MALCZEWSKI, J. 2006. "Ordered weighted averaging with fuzzy quantifiers: GIS-based multicriteria evaluation for land-use suitability analysis". *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 8 (4): 270-277.
- MONTES DE OCA, R. 2013. "Recuperación de áreas dañadas por la minería en la cantera Los Guaos, Santiago de Cuba, Cuba". *Luna Azul*, 37 (0):74-88.
- ORGANIZATION FOR ECONOMIC COOPERATION AND DEVELOPMENT (OECD). 1993. *Environmental indicators for environmental performance reviews*. Paris, Francia.
- PARRA, A. 2003. *Estudio del impacto ambiental provocado por la explotación minera en la cantera del yacimiento Los Guaos*. Departamento de Minería. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. Holguín, Cuba. Tesis de Grado.
- PÉREZ, S. 2015. *Caracterización minero-ambiental de las canteras en la industria de materiales de la construcción de Santiago de Cuba*. Departamento de Minería. Instituto Superior Minero-Metalúrgico de Moa. Holguín, Cuba. Tesis de Grado.
- SABINO, C. 1992. *El proceso de investigación*. Editorial Panapo. Caracas, Venezuela.
- SAATY, T. 1990. *Decision making for Leaders. The Analytic Hierarchy Process for decision in a complex World*. RWS Publications. University of Pittsburgh. Pittsburgh, USA.
- THERESE, L. 1997. *Doing Social Research*. 2ª. Ed. MacGraw Hill. USA.
- VILLANUEVA, T. 2008. *Los áridos en Castilla y León. Sociedad de Investigación y Explotación Minera de Castilla y León (SIEMCALSA)*. Disponible en: <http://www.siemcalsa.com/images/pdf/Los%20aridos.pdf>. [Consulta: agosto, 2017].