

# Datos satelitales ASTER L1B aplicados a la geotermia en Cuba

González-Acosta, V.<sup>1\*</sup>, Torres-Zafra, J.L.<sup>1</sup>, González-Rodríguez, E.M.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Departamento de Yacimientos Minerales, Instituto de Geología y Paleontología-Servicio Geológico de Cuba. Calle Vía Blanca No. 1002. e/ Río Luyanó y Prolongación de Calzada de Güines, Reparto Los Ángeles. San Miguel del Padrón, La Habana, Cuba. CP 11000.*

<sup>2</sup> *UCTB de Investigaciones Geofísicas. Centro de Investigaciones del Petróleo. Calle 23 No 105 / O y P, municipio Plaza de la Revolución. CP 12000. La Habana. Cuba.*

---

**Resumen:** Se seleccionaron y procesaron, para fines geotérmicos, 83 escenas de las bandas termales pertenecientes al canal térmico del sensor ASTER L1B, de los años 2000 a 2008, con un cubrimiento nuboso de casi un 50%. Las coordenadas de los vértices de las imágenes, así como otros datos provenientes de sus metadatos, ayudaron al completamiento de la base de datos diseñada. Se preparó un mosaico preliminar a partir de las imágenes existentes en el país. Las nuevas imágenes, con valor de temperatura, fueron georeferenciadas según el sistema de coordenadas nacional Cuba Norte y se unificaron en otro mosaico para dicha variable. Como resultado, se establecieron 11 clases, divididas aleatoriamente cada 3°C, que ayudaron a delimitar las zonas anómalas donde la mayor distribución de píxeles oscila entre 25°C-37°C; la temperatura de la cobertura nubosa llegó hasta 20°C, aproximadamente. Sobre la imagen clasificada se definieron 69 polígonos, según su grado de perspectiva y con valor de temperatura superior a 40°C, lo cual se corresponde con la baja entalpía (25°C-100°C) que es la de mayor probabilidad en el país. Las imágenes obtenidas fueron superpuestas sobre la del Google Earth, con el fin de discernir la relación entre la cobertura terrestre y su origen antropogénico. Finalmente, se obtuvo una estimación del valor de temperatura de la cobertura terrestre del territorio nacional, lo que permitió definir que la zona oriental es la más perspectiva. Este trabajo constituye una aplicación experimental de las imágenes satelitales ASTER L1B con fines geotérmicos.

**Palabras clave:** Cuba, ASTER L1B, Geotermia, imágenes satelitales.

## ASTER L1B satellite data applied to geothermal in Cuba

**Abstract:** The 83 ASTER L1B thermal channels of Cuban territorial scenes, from 2000 to 2008 years, selected and processed with geothermal aims showed almost 50% of cloudy coverage. The vortex coordinated as well as other data from such metadata facilitated completing the designed database. From a preliminary mosaic with the images existent these were subsequently processed in order to obtain temperature images. Such images were then integrated into another mosaic with a suitable reclassification resulting in 11 classes with 3°C each. This allowed delimitating those anomalous zones where the greater distribution of pixels oscillated from 25°C to 37°C, and the cloudy coverage temperature aroused up to 20°C approximately. In the resulting temperature map, 69 polygons were a priori delimitated and categorized, as for their perspective and the temperature value above 40°C. These polygons were later overlapped to Google Earth images with the aim to identify those from anthropogenic origins. Finally it was obtained an estimation of the temperature value of the surface coverage of the national territory as well as the understanding of that the eastern zone is the most perspective. This is an experimental application, using satellite images ASTER L1B with geothermic purpose.

**Key words:** Cuba, ASTER L1B, Geothermic, satellite image.

\* Autor para la correspondencia: [virginia@igp.minem.cu](mailto:virginia@igp.minem.cu)

## 1. Introducción

El conocimiento de la Geotermia en Cuba tiene su origen en la necesidad de buscar fuentes alternativas de energía para la generación eléctrica y otros usos Zafra *et al.* (2012). La realización de este trabajo es en forma experimental como modo de aplicación del canal térmico infrarrojo de las imágenes satelitales ASTER LIB para tales fines.

Los primeros estudios se realizaron en la década de 1980 y estuvieron encaminados en mediciones de temperatura de fondo de algunos pozos profundos en las regiones occidental y central del país.

La Geotermia es una disciplina científica que comprende el estudio del origen del calor interno de la Tierra, las variaciones de temperatura dentro de la corteza y los fenómenos naturales que influyen sobre la distribución de los flujos geotérmicos, Manual de Geotermia (2008). Los progresos alcanzados en las últimas décadas relacionados con la investigación y el empleo de la energía geotérmica en muchas partes del mundo, hacen que los estudios enmarcados dentro de esta disciplina representen un camino fértil para la generación de un desarrollo sustentable, a través de la aplicación de una fuente de energía que, bien manejada, es altamente limpia y de carácter renovable Zafra *et al.* (2012).

Los yacimientos geotérmicos convencionales se clasifican de acuerdo con los niveles energéticos de los recursos que albergan. Esto es, de los fluidos en ellos contenidos, por lo que se clasifican en:

- **Alta entalpía.** Cumplen las condiciones clásicas de existencia de un yacimiento, el foco de calor permite que el fluido se encuentre en condiciones de presión y alta temperatura (igual o superior a 150°C). Las características termodinámicas del fluido permiten su aprovechamiento para la producción de electricidad. Se sitúan en las zonas geológicamente activas de la corteza.
- **Media entalpía.** Los fluidos se encuentran a temperaturas situadas entre 100°C y 150°C, lo que permite su uso para la producción de electricidad mediante ciclos binarios. Permiten explotar pequeñas centrales de generación eléctrica y el uso directo del calor en aplicaciones industriales, calefacción y refrigeración en

sistemas urbanos. Se encuentran en la periferia de sistemas volcánicos activos, o en zonas afectadas por actividad tectónica actual.

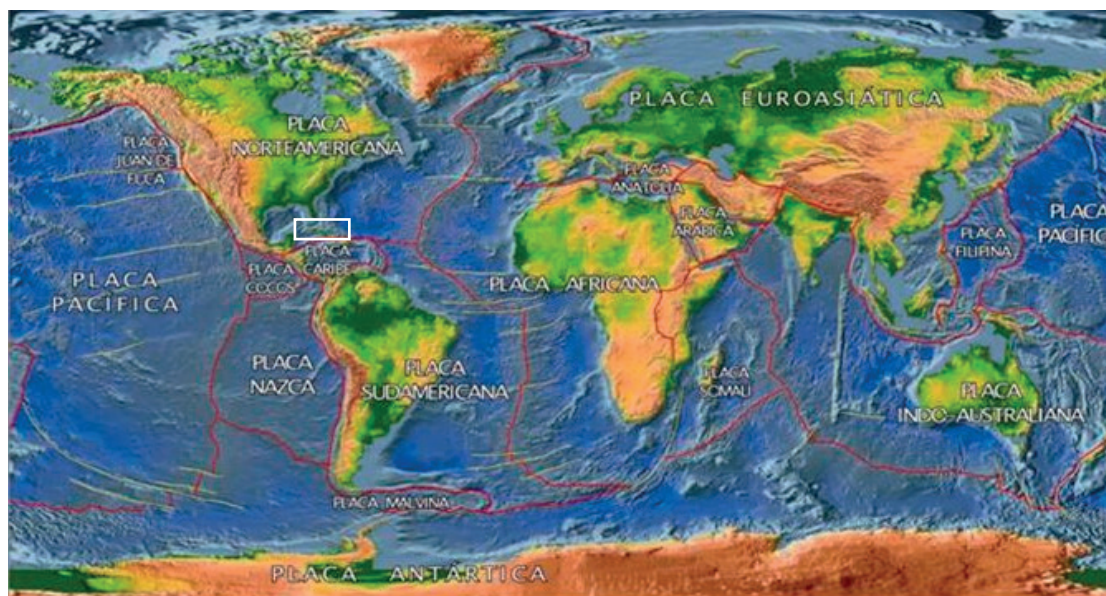
- **Baja entalpía.** La temperatura del fluido es inferior a 100°C y su aplicación es un uso directo del calor (calefacción, procesos industriales y en balneoterapia). Es aprovechable en zonas amplias, como las cuencas sedimentarias, y su existencia se debe al gradiente geotérmico regional y a la actividad tectónica actual.
- **Muy baja entalpía.** Son volúmenes de rocas permeables y de aguas subterráneas en ellos albergadas, con temperaturas estables entre 5°C y 25°C. Permite aprovechar un pequeño salto térmico con fines de calefacción – climatización, a través del uso de bombas de calor. No requieren de gradientes geotérmicos elevados ni de estructuras geológicas o condiciones hidrogeológicas particulares.

A modo de comparación con regiones en el resto del Caribe, la zona climática más próxima y similar es México, que tiene igual latitud que Cuba pero hay que tener en cuenta la influencia de la altura, lo que el clima es un factor dependiente de esta. Los sistemas montañosos de México varían entre 1000-4000 m s.n.m. y en Cuba las altitudes mayores a 1500 m son muy pocas, no llegando ninguna a los 2000 m.

Otros estudios similares sobre la estimación de la temperatura superficial se han realizado a nivel internacional en zonas geológicas y climáticas diferentes a las nuestras, empleando diferentes metodologías y sensores, ejemplo de ellos son Colombia, México, El Salvador, Nicaragua, Honduras, etc., donde en algunos existen plantas generadoras de energía a partir de fuentes geotérmicas.

### 1.1. Antecedentes de las investigaciones geotérmicas en Cuba

Dentro del cuadro geotectónico mundial, Cuba se ubica en el extremo meridional de la placa norteamericana, cerca del contacto de esta con la placa Caribe. La parte suroriental del archipiélago cubano es la más cercana al mencionado límite geotectónico (Figura 1). El contacto entre ambas placas no constituye una zona de expansión o



**Figura 1.** Distribución mundial de las placas corticales. (el cuadro muestra la ubicación de Cuba).

convergencia cortical, por su carácter transcurriente. Es por ello que dicho límite no presenta actividad volcánico-magmática, pero es activa desde el punto de vista tectónico, lo cual se expresa en su elevada sismicidad. Por este motivo, cabe esperar a lo largo de este límite geotectónico la existencia de gradientes térmicos así como de flujos de calor anómalos, generados por la transmisión del calor liberado por la fricción tectónica. A partir de lo anterior, la región sur-oriental de Cuba, que además se caracteriza por presentar una corteza terrestre más delgada en relación con el resto del país, es la más perspectiva para la localización de recursos geotérmicos.

Los estudios sobre aguas termales y/o minero-medicinales realizados en Cuba son numerosos. En cambio, los que abordan directamente la temática de la energía geotérmica son casi inexistentes. Las únicas investigaciones previas en el país se enmarcan en la década antes mencionada, cuando se llevaron a cabo algunos trabajos ejecutados por la Academia de Ciencias de Cuba en colaboración con la Academia de Ciencias de Checoslovaquia. Consistieron en mediciones de temperatura de fondo de algunos pozos profundos en las regiones occidental y central de Cuba, Cermak *et al.* (1982). Sin embargo, el empleo de las imágenes satelitales no incluyó entonces tales propósitos.

Como resultado de esos trabajos, se elaboraron los datos de pozos (de profundidad de 0 m hasta 5000 m) sobre la temperatura del fluido de capa (término usado por los geólogos petroleros para designar el agua subterránea asociada a los depósitos de petróleo y que, regularmente, se encuentra debajo del petróleo). Se llegó a la conclusión de que los valores del gradiente geotérmico en Cuba inferiores a lo normal, tal y como se explica en adelante y varían de Norte a Sur, de  $21,6 \text{ mW/m}^2$  a  $25,1 \text{ mW/m}^2$ . Además, se construyó un perfil térmico de la región estudiada: 500 m:  $36^\circ\text{C}$ , 1000 m:  $46^\circ\text{C}$ , 2000 m:  $66^\circ\text{C}$ , 3000 m:  $86^\circ\text{C}$ , 4000 m:  $106^\circ\text{C}$ , 5000 m:  $126^\circ\text{C}$ . Tenreyro *et al.* (1982).

Dado que el gradiente geotérmico normal en la parte superior de la corteza tiene un valor medio de  $3^\circ\text{C}/100$ , lo cual genera un flujo de calor de  $70 \text{ mW/m}^2$ , los resultados señalados implican que el flujo térmico medido representa sólo entre el 30,86% al 35,86% de su valor normal. Es importante destacar que en los trabajos previos ejecutados por Cermak *et al.* (1982), cuando los autores comentan sobre el gradiente geotérmico en Cuba, solamente se están refiriendo al existente en las regiones occidental y central del país, por ser únicamente en estas regiones donde se tomaron datos térmicos en pozos, como se detalla en

el párrafo anterior, no existiendo dato de entonces para la zona oriental del país.

Posteriormente se realizaron las primeras mediciones de alta exactitud del gradiente térmico en condiciones de pozos estabilizados. El flujo calorífico en las áreas trabajadas (ver ubicación en figura 2), de acuerdo con los nuevos resultados, Cermak *et al.* (1984), es el siguiente:

- Matahambre (provincia de Pinar del Río), 35 mW/m<sup>2</sup> (50% del flujo térmico endógeno normal)
- Boca de Jaruco (provincia de La Habana), 45 mW/m<sup>2</sup> (64,29 % del flujo térmico endógeno normal)
- Guásimas y Camarioca (al sur de Varadero, provincia de Matanzas), hasta 60 mW/m<sup>2</sup>-65 mW/m<sup>2</sup> (85,71%-92,86% del flujo térmico endógeno normal).
- La cuenca central se caracteriza por un flujo calorífico de alrededor de 55 mW/m<sup>2</sup> (78,57% del flujo térmico endógeno normal), llegando a 65 mW/m<sup>2</sup>-80 mW/m<sup>2</sup> (Catalina y Jatibonico), con 92,86%-114,26 % del flujo térmico endógeno normal.

Todos estos valores, considerados preliminares por los autores citados, son, en general, más altos que los obtenidos en el estudio anterior.

Más recientemente, Fagundo (2011) estimó la temperatura y la profundidad de los acuíferos profundos del sistema hidrotermal San Diego de los Baños-Bermejales mediante el uso de los geotermómetros químicos Na-K-Ca-Mg y SiO<sub>2</sub> disuelto, obteniendo los resultados siguientes (Tabla 1).

Los trabajos precedentes demostraron que el territorio cubano, al W de la falla Cauto-Nipe, carece,

a escala regional, de perspectivas para la geotermia de alta y media entalpía, lo cual no niega la existencia de anomalías térmicas locales en esa parte del país. En cuanto a la región sur-oriental de Cuba, sin datos sobre su gradiente geotérmico, la ausencia de magmatismo contemporáneo y de fuentes termales con temperaturas superiores a 45°C permite considerar muy improbable el hallazgo de depósitos geotérmicos de alta entalpía. Por otra parte, los resultados avalan la favorabilidad regional del territorio cubano para el uso de la energía geotérmica de muy baja entalpía, teniendo en cuenta la diferencia térmica existente entre la temperatura del medioambiente atmosférico superficial y la temperatura del subsuelo, según la época del año y características geográficas y climáticas de la región.

Por otra parte, el empleo del sensor ASTER en el proceso de procesamiento e interpretación de sus imágenes satelitales para fines geotérmicos en el territorio nacional no había sido empleada con anterioridad. Se tuvo en cuenta el mapa cosmotogeológico de Cuba, Capote *et al.* (1989) como medio de tener una idea preliminar del territorio nacional a partir de la interpretación de materiales aéreos. La elección de las imágenes ASTER viene dada por las características de sus datos, ya que son aplicables a estudios de recursos naturales y las capacidades espectrales, radiométricas y geométricas del sensor fueron diseñados para estudios geológicos más exhaustivos. Además, las hacen adecuadas para estudios de amplia diversidad a una escala semi-detallada de trabajo. Ejemplo de aplicación de imágenes ASTER son los mapas de temperatura y reflectividad empleando su amplio rango espectral. <http://www.biesimci.org/Satelital/Original/Aster/indices/Asterindex.html> (UNODC).

**Tabla 1.** Estimación de temperatura y profundidad del acuífero profundo del sistema San Diego de los Baños-Bermejales.

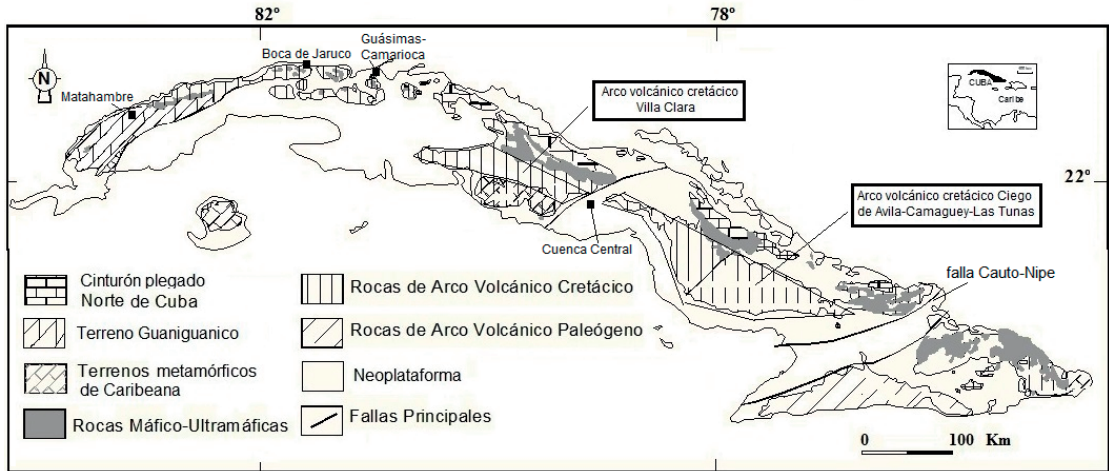
Manantial	Temperaturas (oC)			
	Na-K-Ca-Mg	SiO <sub>2</sub>	R <sub>1</sub>	R <sub>2</sub>
<b>San Diego de los Baños</b>				
El Templado	99	61-67	61-90	90-127
El Tigre	127	88-90		
La Gallina	90-104	67-77		
<b>Bermejales</b>				
M-1	67	63-69	63-77	
M-3	65	65-70		
M-4	58	72-77		
M-5	35	63-69		

Profundidad	T °C
0-87	26
0-122	28
120-200	34
240-281	36
237-320	46

$$\frac{4^{\circ}C}{100m} = \frac{T_r - T_s}{P_x}$$

Manantial	Profundidad	
	R <sub>2</sub>	R <sub>1</sub>
San Diego	1208	658
Bermejales		567





**Figura 2.** Mapa esquemático del territorio cubano, que representa el modelo de su constitución geológica (modificado de Iturralde-Vinent, ed. 2012).

ASTER (las siglas de su nombre en inglés: *Advanced Space-borne Thermal Emission and Reflection Radiometer*) es un sensor satelital de imágenes ópticas de alta resolución geométrica y radiométrica, transportado por el satélite TERRA, puesto en órbita el 18 de diciembre de 1999. El Ministerio de Economía, Comercio e Industria de Japón (METI) impulsó el desarrollo del Proyecto ASTER, con el fin de obtener datos geológicos más detallados y estudiar fenómenos que pudieran producir un impacto ambiental a nivel global; por ejemplo, la actividad volcánica.

Tiene la capacidad de realizar mediciones multiespectrales en los rangos: visible infrarrojo cercano

(VNIR) con 3 bandas entre 0,5  $\mu\text{m}$  y 0,9  $\mu\text{m}$  y 15 m de resolución espacial; infrarrojo de onda corta (SWIR) con 6 bandas entre 1,6  $\mu\text{m}$  y 2,5  $\mu\text{m}$  y 30 m de resolución; y en el infrarrojo térmico (TIR) con 5 bandas entre 8,125  $\mu\text{m}$  y 11,65  $\mu\text{m}$  y 90 m de resolución (Tabla 2). Presenta un ancho de barrido (*swath*) de 60 km. (SEGEMAR, <http://www.segemar.gov.ar/index.php/sensores-remotos/aster/conceptos-basicos>).

Las imágenes a utilizar se tomaron entre las 15:00 y las 17:00 h. Se escogieron las que presentaban una menor cobertura nubosa a partir de un análisis visual, aunque en sentido general la mayoría tiene casi un 50% de cobertura.

**Tabla 2.** Características del sensor ASTER por subsistema y bandas.

Sensor	Subsistema	Banda No.	Longitud de onda ( $\mu\text{m}$ -micrómetro)	Resolución espacial (m)	Resolución radiométrica
ASTER	VNIR	1	0,52 - 0,60	15 m	8 bits
		2	0,63 - 0,69		
		3N	0,78 - 0,86		
		3B	0,78 - 0,86		
	SWIR	4	1,600 - 1,700	30 m	8 bits
		5	2,145 - 2,185		
		6	2,185 - 2,225		
		7	2,235 - 2,285		
		8	2,295 - 2,365		
		9	2,360 - 2,430		
	TIR	10	8,125 - 8,475	90 m	12 bits
		11	8,475 - 8,825		
		12	8,925 - 9,275		
		13	10,25 - 10,95		
14		10,95 - 11,65			

## 1.2. Constitución geológica de Cuba

Cuba presenta una amplia diversidad geológica, representada por las rocas y estructuras formadas antes del Eoceno Superior tardío, e incluye elementos componentes de la placa Norteamericana y la placa Caribe (Iturralde-Vinent, 2012) (Figura 2).

### I.- Componentes de la placa de Norteamérica

Cinturón plegado Norte de Cuba (se incluyen Cayo Coco, Remedios, Camajuaní y Placetas).

Terreno Guaniguanico.

Terrenos metamórficos de Caribeana (Cangre, Pinos, Escambray y Asunción), que en su origen pudieron ser parte de la plataforma de Yucatán.

Cuencas sinorogénicas de foredeep.

### II.- Complejos geológicos con componentes de las placas del Caribe y Norteamericana

Rocas máfico-ultramáficas (los mayores afloramientos del Caribe se exponen en Cuba y afloran en forma de una franja discontinua de más de 1000 km de longitud y un ancho que puede llegar a 30 km en la mitad septentrional y se dividen en distintos tipos según su posición tectónica y la génesis).

### III.- Componentes de la Placa del Caribe

Arcos volcánicos del cretácico (vulcanitas e intrusivos).

Cuencas sinorogénicas postvolcánicas.

El límite Cretácico-Terciario.

Arco volcánico del Paleógeno.

### La Cobertura.

Neoplataforma del Eoceno Superior al Reciente.

## 2. Materiales y métodos

Se seleccionaron y procesaron 83 escenas en total, de diferentes años, pertenecientes al nivel 1B (L1B) del canal térmico del sensor ASTER (Tabla 3) del territorio nacional.

Se unificaron en una base de datos, los datos provenientes del fichero de metadatos de cada una de las escenas empleadas y separadas por años, para un mejor manejo de los mismos (Figura 3). El diseño de la base de datos surge a partir del estudio previo de referencias internacionales, Asia Goethermal database (2010). La Tabla 4 muestra la fecha y hora de toma de la escena y la estación del año a la que pertenece. Los colores en la tabla se relacionan con el del borde de las escenas en la figura antes mencionada. En Cuba se distinguen dos períodos climáticos: uno lluvioso, durante el verano que abarca de mayo-octubre y otro seco en el invierno entre los meses de noviembre-abril.

**Tabla 3.** Cantidad de ficheros ASTER por año utilizados en el procesamiento.

Año de toma de la escena	Cantidad de escenas por años
2000	5
2001	19
2002	17
2003	7
2004	13
2005	4
2006	12
2007	3
2008	3
Total	83

**Figura 3.** Diseño de la estructura de la base de datos.

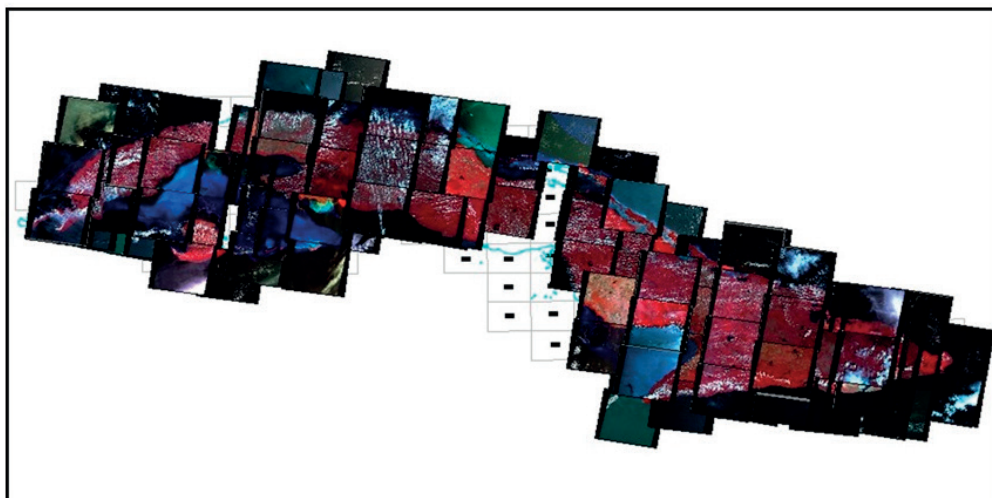
**Tabla 4.** Fechas y estaciones del año de las imágenes utilizadas.

No. en figura 5	No. en Año	No. en la BD	Nombre del fichero ASTER utilizado	día/mes/año	h:min:s	Estación del año
1	2000	1	AST_L1B_00308222000162925_20081014143944_16661	22/08/2000	16:29:25	Verano
2		2	AST_L1B_00308222000162934_20081014144014_17283	22/08/2000	16:29:34	Verano
3		3	AST_L1B_00306302000161207_20081014144024_17383	30/06/2000	16:12:07	Verano
4		4	AST_L1B_00306302000161141_20081014143954_16848	30/06/2000	16:11:41	Verano
5		5	AST_L1B_00306302000161150_20081014144024_17381	30/06/2000	16:11:50	Verano
6	2001	1	AST_L1B_003_07212001155214_07302001100932	21/07/2001	15:52:14	Verano
7		2	AST_L1B_00303132001160645_20081014201846_5149	13/03/2001	16:05:45	Invierno
8		3	AST_L1B_00303132001160654_20081014201847_5166	13/03/2001	16:06:54	Invierno
9		4	AST_L1B_00307122001155817_20081014201837_4948	12/07/2001	15:58:17	Verano
10		5	AST_L1B#003_10252001154927_11102001123931	25/10/2005	15:49:27	Verano
11		6	AST_L1B_003_06242001161034_07022001074738	24/06/2001	16:10:34	Verano
12		7	AST_L1B_003_10022001154345_11292003212310	02/10/2001	15:43:45	Verano
13		8	AST_L1B_00302212001163228_20081014201726_3290	21/02/2001	16:32:28	Invierno
14		9	AST_L1B_00303252001163135_20060705111847_25562	25/03/2001	16:31:35	Invierno
15		10	AST_L1B_00306132001162945_20061019034306_25109	13/06/2001	16:29:45	Verano
16		11	AST_L1B_00303062001160135_20081014201716_3142	06/03/2001	16:01:35	Invierno
17		12	AST_L1B_00302212001163236_20081014201836_4935	21/02/2001	16:32:36	Invierno
18		13	AST_L1B_00305162005161359_20081014083023_30311	16/05/2001	16:13:59	Verano
19		14	AST_L1B_00311262001154838_20081014201917_5537	26/11/2001	15:48:38	Invierno
20		15	AST_L1B_00305162001160618_20081014201826_4584	16/05/2001	16:06:18	Verano
21		16	AST_L1B_00307122001155835_20081014201826_4577	12/07/2001	15:58:35	Verano
22		17	AST_L1B_00306082001161135_20060705111136_22069	08/06/2001	16:11:35	Verano
23		18	AST_L1B_00310072001160204_20081014201917_5535	07/10/2001	16:02:24	Verano
24		19	AST_L1B_00303062001160144_20081014201846_5154	06/03/2001	16:01:44	Invierno
25	2002	1	AST_L1B_003_01252002161103_02152002104839	25/01/2002	16:11:03	Invierno
26		2	AST_L1B_00301112002155833_20081014201005_11216	11/01/2002	15:58:33	Invierno
27		3	AST_L1B_00301252002161045_20081014200655_7402	25/01/2002	16:10:45	Invierno
28		4	AST_L1B_00301252002161054_20060705110806_20566	25/01/2002	16:10:54	Invierno
29		5	AST_L1B_00304262002155152_20081014200805_8739	26/04/2002	15:51:52	Invierno
30		6	AST_L1B_00305052002154544_20081014201005_11215	05/05/2002	15:45:44	Invierno
31		7	AST_L1B_00308302002160334_20081014200935_10851	30/08/2002	16:03:34	Verano
32		8	AST_L1B_00308302002160343_20081014201006_11212	30/08/2002	16:03:43	Verano
33		9	AST_L1B_00308302002160352_20081014200856_9963	30/08/2002	16:03:52	Verano
34		10	AST_L1B_00310312002161545_20081014200915_10251	31/10/2002	16:15:45	Verano
35		11	AST_L1B#003_02142002154542_03012002104021	14/02/2002	15:45:42	Invierno
36		12	AST_L1B_00301112002155900_20060705111557_24396	11/01/2002	15:59:00	Invierno
37		13	AST_L1B_00304262002155143_20081014200805_8744	26/04/2002	15:51:43	Invierno
38		14	AST_L1B_00305052002154536_20081014200845_9775	05/05/2002	15:45:36	Verano
39		15	AST_L1B_00310102002155717_20081014200815_8948	10/10/2002	15:57:17	Verano
40		16	AST_L1B_00301202002155239_20081014200655_7397	20/01/2002	15:52:39	Invierno
41		17	AST_L1B_00301112002155842_20081014200805_8730	11/01/2002	15:58:42	Invierno
42	2003	1	AST_L1B_00301232003155116_02112003093157	23/01/2003	15:51:16	Invierno
43		2	AST_L1B_00303012003160859_20081014120752_2085	01/03/2003	16:08:59	Invierno
44		3	AST_L1B_00303012003160908_20060705110856_20771	01/03/2003	16:09:08	Invierno
45		4	AST_L1B_00305082003154441_20081014120711_1264	08/05/2003	15:44:41	Verano
46		5	AST_L1B_00309072003161956_20081014120812_2337	07/09/2003	16:19:56	Verano
47		6	AST_L1B_00309162003161346_20081014120721_1513	16/09/2003	15:13:46	Verano
48		7	AST_L1B_00307232003160713_20081014120711_1278	23/07/2003	16:07:13	Verano
49	2004	1	AST_L1B_00301222004161544_20081014100818_7475	25/01/2004	16:15:44	Invierno
50		2	AST_L1B_00302272004155055_20081014083033_30851	27/02/2004	15:50:55	Invierno
51		3	AST_L1B_00302272004155104_20081014100708_6182	27/02/2004	15:51:04	Invierno
52		4	AST_L1B_00304082004154358_20081014100738_6794	08/04/2004	15:53:48	Invierno

(continúa en la página siguiente)

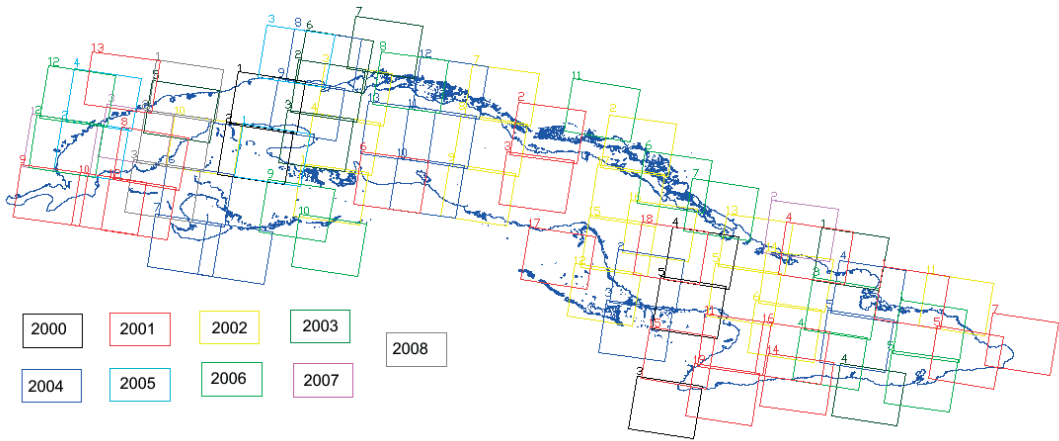
**Tabla 4.** Fechas y estaciones del año de las imágenes utilizadas. (continúa de la página anterior)

No. en figura 5	No. en la BD	No. en la BD	Nombre del fichero ASTER utilizado	día/mes/año	h:min:s	Estación del año
53	5	5	AST_L1B_00304082004154407_20081014083053_31413	08/04/2004	15:44:07	Invierno
54	6	6	AST_L1B_00304272004161448_20081014083103_31642	27/04/2004	16:14:48	Invierno
55	7	7	AST_L1B_00304272004161457_20081014083133_32081	27/04/2004	16:14:57	Invierno
56	8	8	AST_L1B_00308172004161347_20081014082942_29086	17/08/2004	16:13:47	Verano
57	9	9	AST_L1B_00310202004161327_20081014100648_5828	20/10/2004	16:13:27	Verano
58	10	10	AST_L1B_00311232004160058_20081014100738_6789	23/11/2004	16:00:58	Invierno
59	11	11	AST_L1B_00311232004160049_20081014100738_6804	23/11/2004	16:00:49	Invierno
60	12	12	AST_L1B_00311232004160040_20081014100648_5833	23/11/2004	16:00:40	Invierno
61	13	13	AST_L1B_00307022004160159_20081014100828_7713	02/07/2004	16:01:59	Verano
62	2005	1	AST_L1B_00303132005161400_20060705111016_21344	13/03/2005	16:14:00	Invierno
63		2	AST_L1B_00304212005162027_20081014083223_32671	21/04/2005	16:20:27	Invierno
64		3	AST_L1B_00303132005161342_20081014100658_5952	13/03/2005	16:13:42	Invierno
65		4	AST_L1B_00304212005162018_20081014083023_30309	21/04/2005	16:20:18	Invierno
66	2006	1	AST_L1B_00303222006153727_20081014100806_22968	22/03/2006	15:37:27	Invierno
67		2	AST_L1B_00305102006162012_20081014100936_25694	10/05/2006	16:20:12	Verano
68		3	AST_L1B_00304212006154948_20081014101026_26911	21/04/2006	15:49:48	Invierno
69		4	AST_L1B_00304212006154957_20081014101006_26504	21/04/2006	15:49:57	Invierno
70		5	AST_L1B_00305092006153741_20070315025305_5460	09/05/2006	15:37:41	Verano
71		6	AST_L1B_00308112006154948_20081014100936_25687	11/08/2006	15:49:48	Verano
72		7	AST_L1B_00308182006155557_20081014100936_25677	18/08/2006	15:55:57	Verano
73		8	AST_L1B_00308252006160149_20081014100746_22266	25/08/2006	16:01:49	Verano
74		9	AST_L1B_00310262006161401_20081014101036_27559	26/10/2006	16:14:01	Verano
75		10	AST_L1B_00311202006160810_20081014100746_22254	20/11/2006	16:08:10	Invierno
76		11	AST_L1B_00304032006160131_20070315025405_6307	03/04/2006	16:01:31	Invierno
77		12	AST_L1B_00305102006162003_20081014100816_23204	10/05/2006	16:20:03	Verano
78	2007	1	AST_L1B_00301212007162054_20081014100906_24635	12/12/2007	16:20:54	Invierno
79		2	AST_L1B_00308072007154419_20081014100906_24640	07/08/2007	15:44:19	Verano
80		3	AST_L1B_00308102007161455_20081014100736_21984	10/08/2007	16:14:55	Verano
81	2008	1	AST_L1B_00309132008161450_20081013045753_7405	13/09/2008	16:14:50	Verano
82		2	AST_L1B_00309132008161459_20081013045823_7745	13/09/2008	16:14:59	Verano
83		3	AST_L1B_00309132008161508_20081013045653_6615	13/09/2008	16:15:08	Verano



**Figura 4.** Mosaico de imágenes ASTER L1B existentes del territorio nacional.

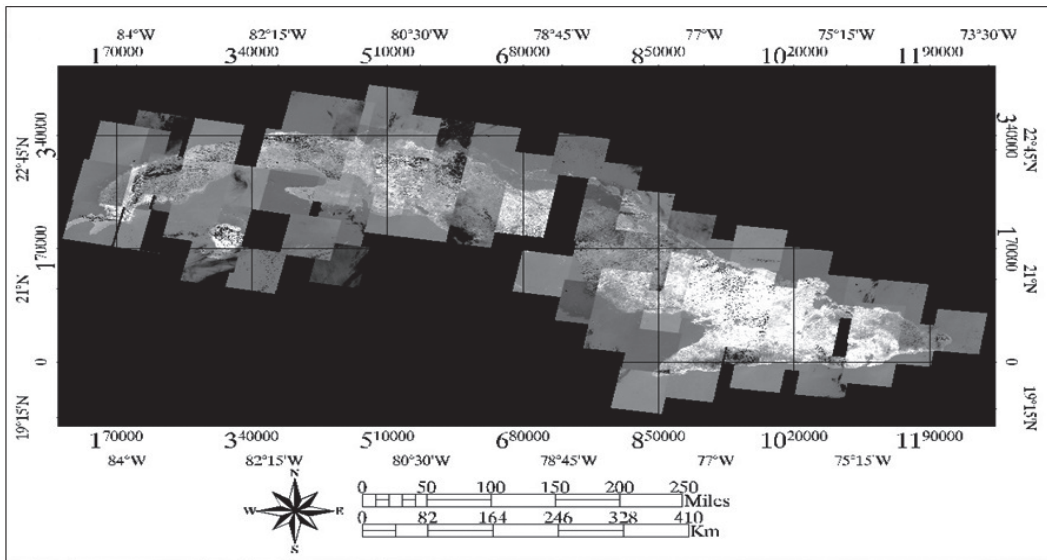




**Figura 5.** Montaje de los vértices de las escenas ASTER L1B empleadas.

Con la base de datos y a partir de un mosaico preparado previamente de toda la cobertura del territorio nacional de imágenes ASTER L1B (Figura 4) que sirvió de guía para seleccionar las escenas, se registraron sus vértices, donde se obtuvo un montaje final de las escenas utilizadas (Figura 5).

En la fase de pre-procesamiento se calculó la emisividad mediante el método de normalización de la emisividad, a partir del menú del software ENVI 4.7 (Exelis Visual Information Solutions, Boulder, Colorado), con el fin de separar la información de emisividad y temperatura en datos de radiancia, medidos con el infrarrojo térmico. Este



**Figura 6.** Mosaico de imágenes procesadas e interpretadas para el valor de temperatura, mostrando además la cobertura nubosa (color negro existentes a todo lo largo del territorio nacional). El color blanco más intenso se corresponde con el valor de temperatura más alta (zona oriental). El blanco menos intenso y los tonos de grises se corresponden con valores de temperaturas más bajos. El color negro de la figura se asocia a zona sin datos. Se observa una distribución desigual entre la parte occidental-centro y oriental.

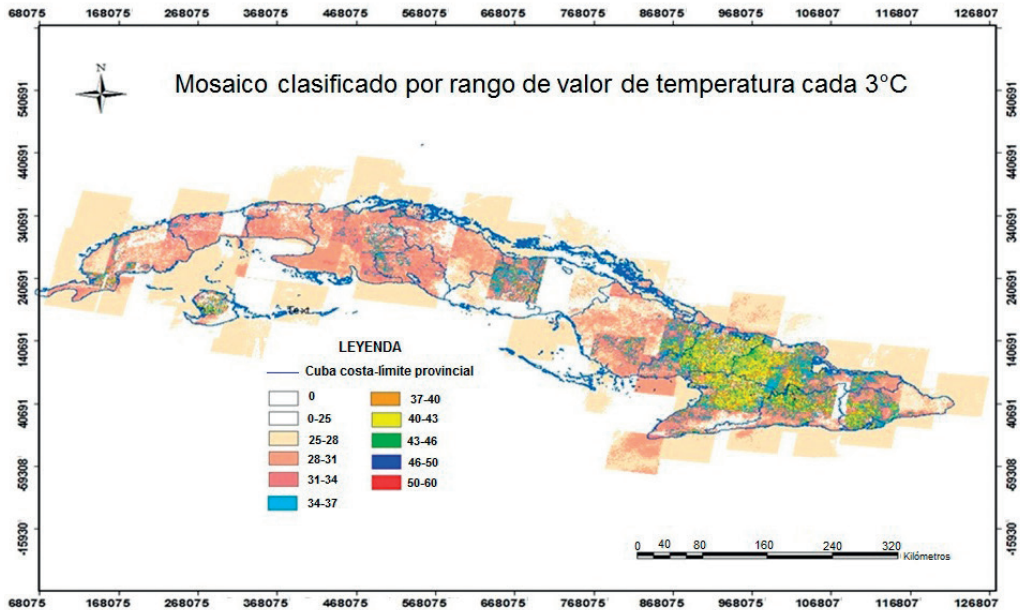


Figura 7. Mosaico clasificado por rango de valor de temperatura.

método, desarrollado por Gillespie *et al.* (1998), calcula la temperatura para cada píxel y banda en los datos que utilizan un valor de emisividad fijo. La temperatura más alta para cada píxel se utiliza para calcular los valores de emisión de acuerdo con la función Planck. Las imágenes se transformaron a emisividad y temperatura, esta última fue georreferenciada al sistema de coordenadas nacional Cuba Norte, se transformó de grados Kelvin a Celsius y se rotaron geográficamente para llevarlas a su orientación real. Se aplicaron coeficientes de recalibración radiométricas [(http://tonolab.cis.ibaraki.ac.jp/ASTER/RECAL/index.html) (Último acceso: 07 de junio 2012)] y posteriormente una transformación lineal del 2% para su realce, aplicándose una máscara a cada una de las imágenes para eliminar los solapamientos o zonas sin datos.

### 3. Resultados y discusión

Del procesamiento e interpretación de los datos se obtuvo un mosaico de imágenes con valor de temperatura para todo el territorio, que tuvo en cuenta un solapamiento de 10 píxeles y el valor 0 para el fondo (Figura 6). De dicho mosaico, que

además muestra la cobertura nubosa existente en las imágenes, se definió que el valor de temperatura de dicha cobertura oscila hasta 20°C aproximadamente.

Seguidamente se definieron 11 clases (Tabla 5) divididas, aleatoriamente, cada 3°C, lo que permitió la obtención de un mayor grado de detalle e información, así como la clasificación de la imagen (Figura 7). También se establecieron las posibles zonas anómalas teniendo en cuenta el valor de la temperatura. El histograma extraído de la imagen (Figura 8) muestra que la mayor

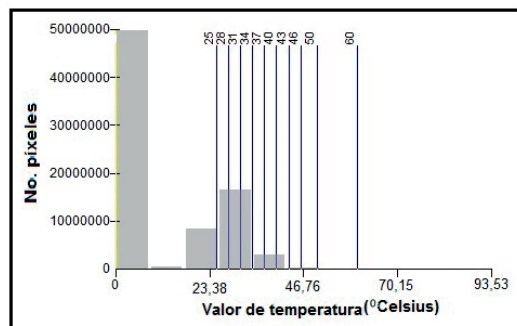


Figura 8. Histograma de distribución de los píxeles en la imagen por valor de temperatura.

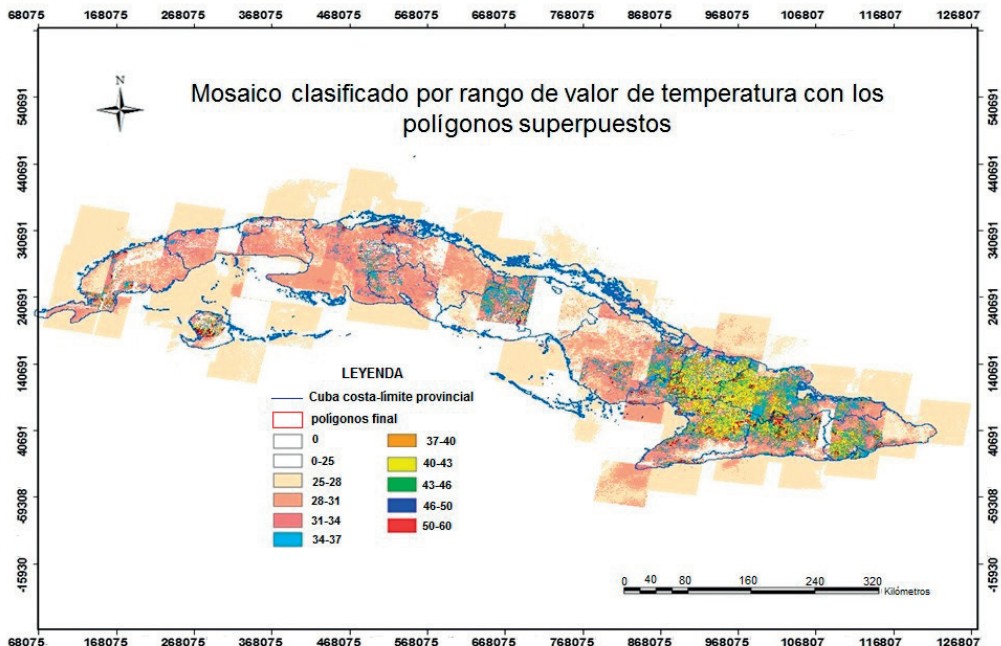
**Tabla 5.** Rangos de temperatura y su descripción.

No. clase	Rangos de temp.	Color de relleno	Nombre del color	RGB	Observaciones
1	0	Transparente	Transparente	-	Background
2	0-25		Blanco	255-255-255	Principalmente se corresponde con nubes
3	25-28		Sahara sand	255-235-190	Principalmente se corresponde con nubes y sombra
4	28-31		Cantaloupe	255-167-127	-
5	31-34		Medium coral	245-122-122	-
6	34-37		Moorea blue	0-169-130	-
7	37-40		Seville orange	230-152-0	-
8	40-43		Solar yellow	255-255-0	-
9	43-46		Leaf green	56-168-0	-
10	46-50		Blue	0-0-255	-
11	50-60		Mars red	255-0-0	-

distribución de píxeles se corresponde con los valores de temperatura comprendidos entre 25°C y 37°C. La barra mayor correspondiente a 0°Celsius representa el fondo de la imagen y las contiguas, que alcanzan valores inferiores a 25°Celsius, a la cobertura nubosa.

En la imagen resultante se identificaron, *a priori*, 179 anomalías térmicas superficiales en total, enmarcadas en forma de polígonos, que

fueron delimitados por grado de perspectiva y según el valor de temperatura superior a 40°C (Figura 9), este umbral se establece teniendo en cuenta la existencia de suficientes usos posibles (Tabla 6) que justifican de manera económica la realización de investigaciones geotérmicas para el caso de Cuba, donde no existen arcos volcánico activos y el grado de conocimiento geotérmico es mínimo. Esto guarda correspondencia con la baja entalpía (25°C-100°C) que es, de acuerdo con las



**Figura 9.** Mosaico clasificado por rango de valor de temperatura con los polígonos superpuestos.

**Tabla 6.** Usos posibles de la energía geotérmica en Cuba.

Uso	Rango de temperatura	
	Min. °C	Máx. °C
Recursos de Muy Baja Entalpía	5	25
Climatización por bombas de calor	5	25
Recursos de Baja Entalpía	25	100
Acuicultura	25	35
Procesos de biogás	35	45
Fermentación - biodegradación	30	50
Piscinas climatizadas	25	40
Calentamiento de suelos	15	38
Cultivo de hongos	40	50

condiciones del territorio nacional, la de mayor probabilidad de encontrar en Cuba desde el punto de vista geotérmico.

Los polígonos delimitados de acuerdo al valor de temperatura se superpusieron sobre la imagen de Google Earth con la finalidad de discriminar su relación con la cobertura terrestre, donde finalmente se eliminaron 10 de los mismos. (Figura 10).

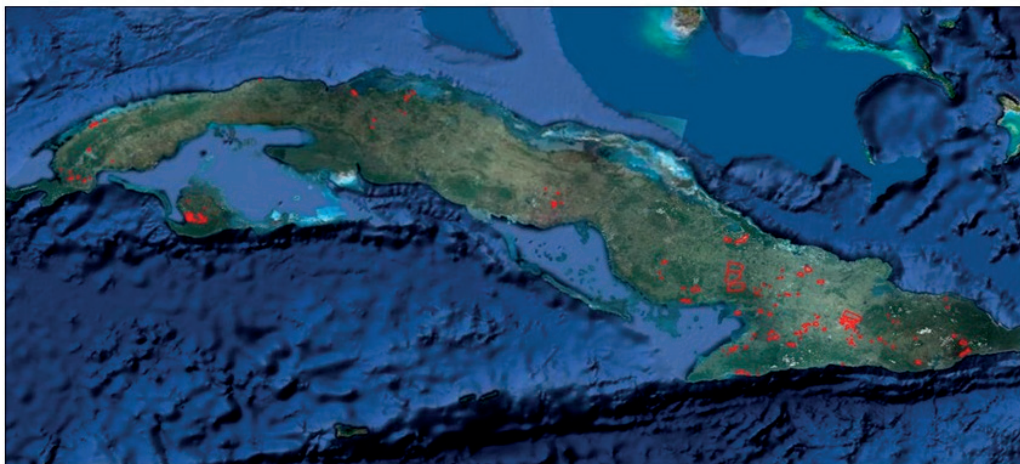
Al analizar los polígonos descartados, se comprobó que 6 son de origen claramente antropogénico (construcciones y canteras) y 4 responden a rasgos de uso del suelo, así como al estado y tipo de vegetación. Aparte de estas anomalías se encontraron otras 24 que pueden tener similar origen y/o ser causadas por efectos de iluminación generados por el relieve. Sin embargo, la baja resolución de las imágenes impidió su descarte por no ser

fiables. De este modo, se consideran 169 anomalías perspectivas.

### 3.1. Anomalías geotérmicas y sectores favorables

La creación de un mapa de interpretación compleja, resultante de la superposición de las 169 anomalías térmicas identificadas *a priori* sobre la combinación de otras evidencias permitió caracterizar mejor su perspectiva e identificar sectores favorables adicionales. Para completar esta parte del estudio, se utilizaron ulteriormente los mapas derivados del procesamiento de la información térmica aportada por los pozos de petróleo. Así, a partir de la información térmica de manantiales y de pozos hidrogeológicos, fueron identificados un total de 20 sectores perspectivas adicionales. Al considerar la información brindada por los pozos de petróleo, se delimitaron otros 5 sectores, para un total general de 194 sectores perspectivas distribuidos por todo el país (a verificación futura), como puede apreciarse en la Tabla 7 y en la Figura 11.

Una mirada general al mapa mosaico clasificado de temperatura superficial de Cuba obtenido (Figura 6), muestra la existencia de un desnivel térmico general si se compara el territorio extendido desde la provincia Las Tunas hacia el W con el resto del territorio situado a ESE de esta



**Figura 10.** Imagen el Google Earth. El color rojo se corresponde con los polígonos delimitados según valor de temperatura.



**Tabla 7.** Distribución por provincias de los sectores favorables.

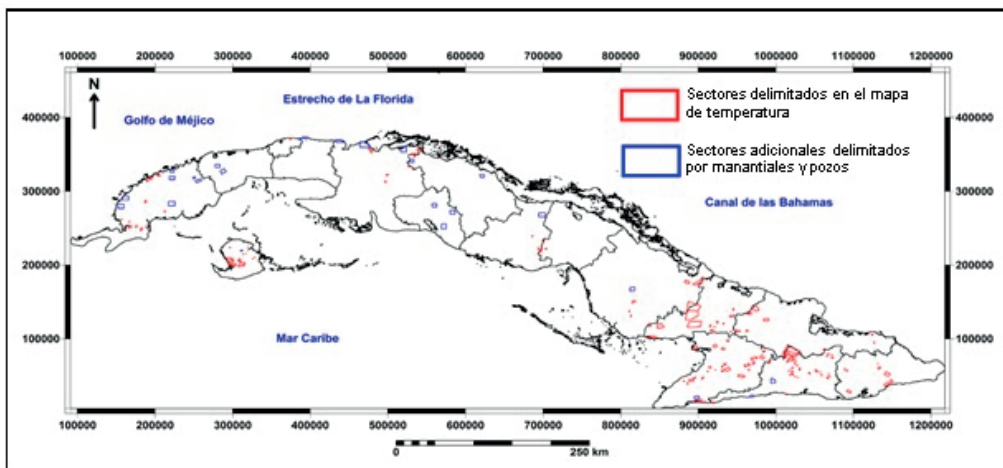
Provincia	Cantidad de sectores
Pinar del Río	20
Artemisa	2
Isla de la Juventud (municipio especial)	23
La Habana	2
Mayabeque	2
Matanzas	13
Cienfuegos	3
Villa Clara	5
Sancti Spiritus	4
Ciego de Ávila	3
Camagüey	6
Las Tunas	17
Gramma	32
Holguín	10
Santiago de Cuba	42
Guantánamo	10
Total	194

provincia. Para validar este hecho, se trazó un perfil térmico longitudinal de Cuba, extendido desde la Bahía de Guadiana (municipio Sandino, Pinar del Río) hasta Baitiquiri (municipio San Antonio del Sur, Guantánamo), con una longitud total de 1048,95 km (Figura 12). A este perfil se le realizó la estadística descriptiva (Tabla 8) que permitió dividir los datos térmicos en dos grupos: el primero, extendido desde el km 0 (Bahía de Guadiana) hasta el km 730 (al W y cerca de la ciudad de Camagüey). El segundo grupo de datos

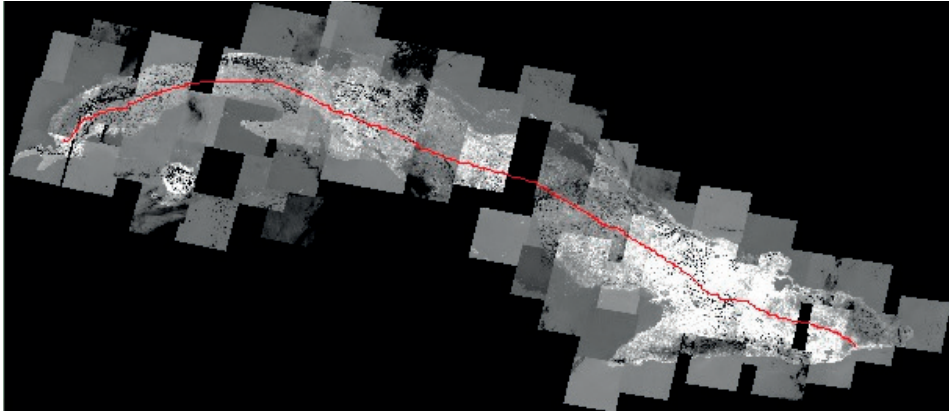
**Tabla 8.** Estadística descriptiva de los segmentos centro-este y oriental del perfil longitudinal de Cuba.

Parámetro	Parte W	Parte E	Diferencia
Media	29,8	37,5	7,7
Error típico	0,05	0,08	0,03
Mediana	29,7	37,9	8,2
Moda	30,3	39	8,7
Desviación estándar	3,9	4,8	-
Varianza de la muestra	15,3	22,7	-
Curtosis	1,2	1,2	-
Coefficiente de asimetría	-0,07	-0,6	-
Rango	32,9	33,5	-
Mínimo	12,4	17,9	-
Máximo	45,4	51,5	-
Cuenta	7341,0	3348,0	-

corresponde a la parte del perfil extendida más hacia ESE; esto es, hasta su final. Cabe señalar que para la estadística de la Tabla 8 no se realizó previamente una máscara de nubes debido a la abundancia de estas en las imágenes empleadas que como se explicó en el texto, no impidió lograr los objetivos propuestos, esto no significa que no se reconozca la influencia de la cobertura nubosa. Como se aprecia en la Figura 5, la proporción de nubes en la parte Occidental-Centro de Cuba es mucho mayor que hacia el extremo Oriental. Ello puede explicar en parte la diferencia de temperatura observada en la Tabla 8. Asimismo, es en la zona Oriental donde se alcanzan los más altos valores de insolación y temperatura máxima media, como se muestra en Campos (1987) y Lapinell y Echevarría (1987), respectivamente.



**Figura 11.** Mapa de sectores térmicamente anómalos de Cuba escala 1:3 500 000.



**Figura 12.** Esquema de ubicación del perfil térmico longitudinal de Cuba en el mapa mosaico de temperatura. El perfil es representado por la línea roja. El rectángulo rojo es un rasgo del software de origen, carente de significado a los fines de la figura.

En efecto, como puede apreciarse en la Figura 13, se evidencia un cambio en el nivel del fondo térmico, marcadamente más alto en la región oriental en relación con el resto del país. Este rasgo se confirma al examinar las estadísticas de los dos *clusters* o grupos de datos en que se dividió el perfil. Esta diferencia se halla en el entorno de los 8°C.

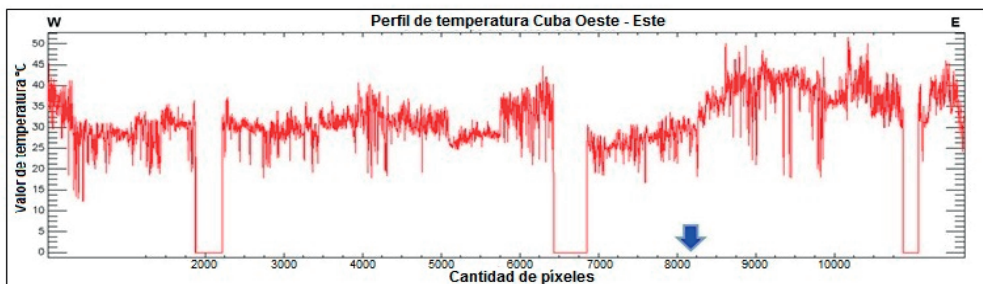
Aunque se trata de una diferencia realmente significativa, hay factores no geológicos que indudablemente contribuyen a su existencia, como son:

- Temperatura media atmosférica. En la región oriental es más alta (máxima media de 29-32°C en las zonas llanas, llegando a 34°C en los meses de julio y agosto) que en la parte central y occidental del país (28-30°C, que puede alcanzar 33°C en julio), Lapinell y Echevarría (1987).

- Cobertura nubosa. En las imágenes correspondientes a la parte occidental y central del territorio cubano es mayor que en las de la parte oriental.

En este mismo sentido, es de notar que la zona del país donde las imágenes utilizadas presentan menor cobertura nubosa coincide con la de mayor insolación media anual, entre 8 y 8,5 horas diarias, Campos (1987), lo cual se corresponde con el registro de las mayores temperaturas medias máximas anuales y mensuales. Todo esto, como es lógico, produce cierto desplazamiento hacia el oeste de la zona de cambio de nivel, en relación con el lugar donde debería situarse si la temperatura superficial cartografiada respondiera exclusivamente a causas geológicas.

Otra posible fuente de desnivel es la diferencia de fecha (y de época del año) en las cuales fueron tomadas las imágenes. Al respecto, la



**Figura 13.** Perfil térmico longitudinal de Cuba según datos satelitales de temperatura superficial estimados. El eje X indica la longitud en píxeles. El km 730 se halla donde indica la flecha azul y es a partir de dónde se observa el incremento del valor de la temperatura.

Tabla 9 muestra que hay imágenes tomadas en invierno y en verano, tanto en la parte centro-oeste como en la oriental del país. La proporción entre las estaciones climatológicas es bastante similar.

Adicionalmente, se tiene que, de acuerdo con sus correspondientes histogramas de porcentaje acumulativo, para la parte centro-occidental del perfil, al W del km 730, el 90% de porcentaje acumulado se alcanza a la temperatura de 34,8°C, mientras que para su parte oriental, al E del mencionado km 730, el 90% de porcentaje acumulado se alcanza a la temperatura de 43,5°C, lo que arroja una diferencia de valores de 8,7°C.

Esta diferencia regional en la temperatura de fondo argumenta la diferente perspectiva dada a anomalías térmicas con igual rango de temperaturas identificadas por vía satelital, pero ubicadas en uno u otro lado de Cuba.

**Tabla 9.** Distribución temporal de las escenas ASTER L1B empleadas.

Región	Escenas ASTER L1B		
	Total	Verano	Invierno
Pinar del Río - Camagüey	47	25	22
Camagüey - Oriente	36	17	19

En cuanto a la distribución espacial de los sectores, hay una clara diferencia entre la cantidad de sectores térmicamente anómalos identificados entre las partes centro-oeste y oriental de Cuba: 54 en la primera y 115 en la segunda (sin incluir las 10 eliminadas, por ser de origen claramente no geológico). Parte de esta diferencia tiene su origen en la influencia de la cobertura nubosa presente en las imágenes utilizadas en la confección del mapa clasificado de temperaturas superficiales, considerablemente mayor desde Pinar del Río hasta Ciego de Ávila que desde Camagüey hacia el E.

Un elemento importante considerado a la hora de establecer la importancia (orden de prioridad) de los sectores es el hecho de que tanto el mapa de temperaturas obtenido como las imágenes térmicas en general son muy sensibles al clima y a los cambios de estado de la superficie terrestre, tanto de origen natural como antropogénico. Ello hace que resulte extremadamente difícil discernir con seguridad cuándo una zona con valores anómalos

responde o no a causas geológicas endógenas. En consecuencia, la evidencia aportada por este mapa, se consideró subordinada, dándosele mayor peso a otras fuentes de evidencias a la hora de establecer el mencionado orden de prioridad.

Es importante destacar que los datos reales disponibles sobre manifestaciones y depósitos de aguas termales, pozos hidrogeológicos profundos y pozos de petróleo, permitió compensar, en alguna medida, las insuficiencias presentadas por el mapa clasificado de temperatura, tanto por la abundancia de cobertura nubosa como por otras causas.

#### 4. Conclusiones

El empleo de los datos satelitales ASTER L1B de forma experimental y para fines geotérmicos permitió obtener una estimación superficial de la temperatura según el procedimiento aplicado, que en conjunto con el resto de la metodología de procesamiento para las imágenes térmicas, arrojó como resultado una aproximación del comportamiento de la misma para el territorio nacional.

De acuerdo con los procedimientos empleados se constata que la zona oriental es la más perspectiva para fines geotérmicos, ya que es donde existe una mayor frecuencia de distribución de píxeles con los mayores valores de temperatura (superiores a 40°C), lo cual corrobora los resultados obtenidos en los trabajos realizados en la década de 1980, y que permite definir que la energía que con mayor probabilidad puede encontrarse en el territorio cubano es la de baja entalpía (25-100°C).

La distribución temporal de las mediciones térmicas superficiales y sub-superficiales a lo largo de varios años, así como la ausencia de una metodología uniforme de medición y otros condicionantes, como la carencia de registros térmicos que permitan conocer la distribución vertical de las temperaturas en los pozos (sean o no de petróleo), la frecuente asignación de las mediciones conocidas en ellos, a intervalos muy grandes, y el alto nivel de cobertura nubosa de las imágenes ASTER L1B empleadas, son factores a tener en cuenta en la utilización práctica de la información térmica existente en la actualidad.

## Agradecimientos

Se agradece al Centro Nacional de Información Geológica (CNIG) del Instituto de Geología y Paleontología-Servicio Geológico de Cuba por su contribución en la revisión y edición y a los revisores anónimos por los comentarios útiles y discusiones sobre el manuscrito. A Silvia Castro Godoy (Servicio Geológico y Minero de Argentina-SEGEMAR) y Diego Azcurra, por su contribución.

## Referencias

- ASTER TIR Recalibration <http://tonolab.cis.ibaraki.ac.jp/ASTER/RECAL/index.html> [Último acceso: 7 de junio de 2012].
- Campos, A. 1987. Mapas de insolación media de Cuba a escala 1:2000000. *Atlas Climático de Cuba*. La Habana: Instituto de Meteorología e Instituto Cubano Geodesia y Cartografía.
- Capote, C., Arseniev, Y.M., Kalachov, S.N., Strazhevich, V.P. 1989. Mapa cosmo-fotogeológico de Cuba a escala 1:500000. *I Congreso Cubano de Geología*. Resúmenes La Habana.
- Cermak, V., Kresl, M., Safanda, J., Nápoles-Pruna, M., Tenreyro-Pérez, R., Valdés, J., Torres-Paz, L.M. 1984. First Heat flow density assessments in Cuba. *Tectonophysics*, 103, 283-296.
- Cermak, V., Kresl, M., Nápoles, M., Tenreyro, R., Valdés, J., Torres, L. 1982. Mediciones profundas de temperatura en Cuba occidental y central. *Serie geológica*, 2, 93-109
- Fagundo, J.R., 2011. *Recursos Geotérmicos. Usos actuales y perspectivas*. Comunicación escrita.
- Gillespie, A.R., Matsunaga, T., Rokugawa, S., Hook, S.J. 1998. Temperature and emissivity separation from Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36, 1113-1125. <http://dx.doi.org/10.1109/36.700995>
- Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE) e Instituto Geológico y Minero de España (IGME), 2008. *Manual de geotermia*. Madrid. [www.idae.es](http://www.idae.es)
- Iturralde-Vinent, M.A. (ed). 2012. *Compendio de Geología de Cuba y del Caribe*. Segunda Edición. DVD-ROM. Editorial CITMATEL, La Habana, Cuba.
- Lapinell, B., Echevarría, S. 1987. Mapas de temperatura media de Cuba a escala 1:2000000. *Atlas climático de Cuba*. La Habana: Instituto de Meteorología e Instituto Cubano Geodesia y Cartografía.
- SEGEMAR. 2015. Datos ASTER Conceptos básicos. *SEGEMAR Servicio Geológico Minero Argentino*, de <http://www.segemar.gov.ar/index.php/sensores-remotos/aster/conceptos-basicos>
- Tenreyro, R., Barcelo, G., Napoles, M., 1987. Mediciones de temperatura de fondo de pozos de petróleo. Generalización. *Bol. Técnico MINBAS Petróleo*, 1, 20-26.
- UNODC, Oficina de las Naciones Unidas contra la Droga y el Delito. 2015. *Imágenes originales ASTER*, de <http://www.biesimci.org/Satelital/Original/Aster/indices/Asterindex.html>.
- Zafra, T.J.L., González, A.V., González, R.E.M., et al. 2012. *Evaluación del potencial geotérmico de Cuba*. Instituto de Geología y Paleontología. La Habana. Inédito.