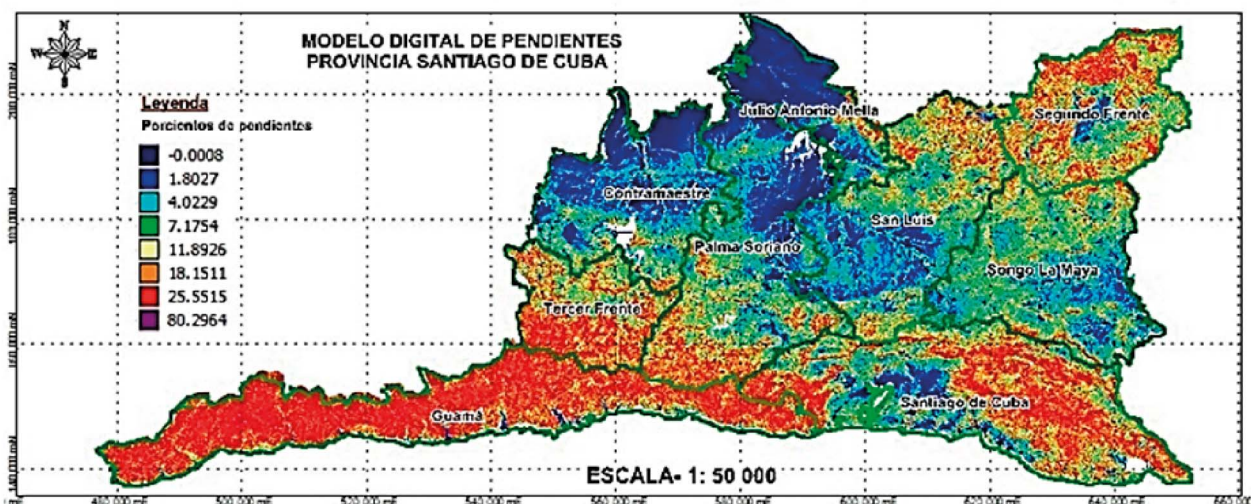
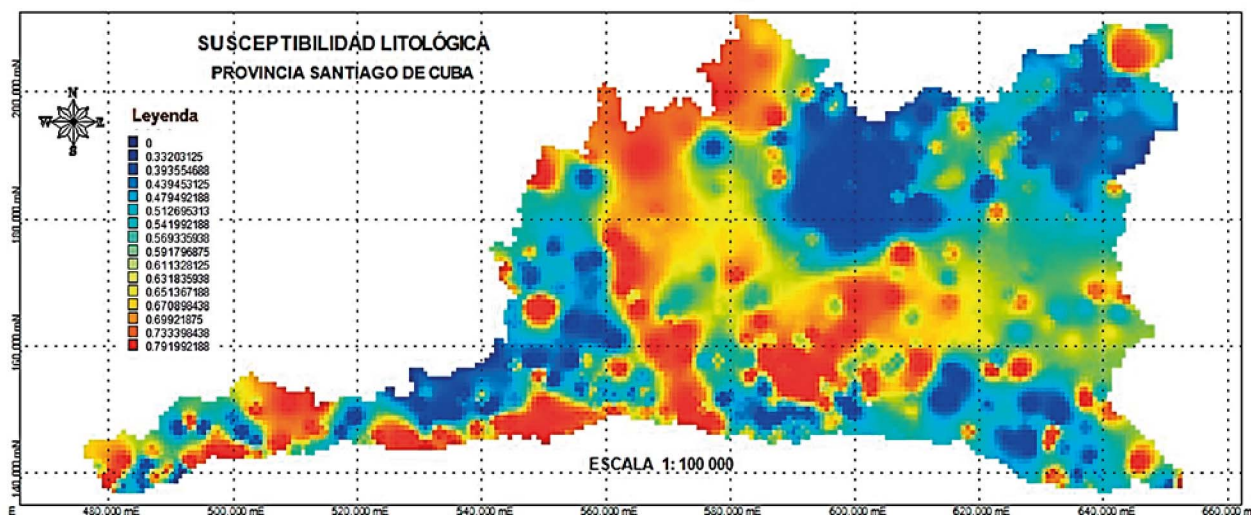


BOLETÍN DE CIENCIAS DE LA TIERRA

No. 49, Agosto de 2020 - Enero de 2021

ISSN 0120 - 3630



Principales procesos y fenómenos geológicos conducentes a riesgos en la provincia Santiago de Cuba, Cuba
Galbán-Rodríguez et al

Departamento de Geociencias y Medio Ambiente
Facultad de Minas
Sede Medellín



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA



Gravimetric analysis and calculation of the strength of a liquid in the La Malinche volcano, Puebla-Tlaxcala, Mexico

Rogelio Ramos-Aguilar^a, Patricia Máximo-Romero^a, Víctor Galindo-López^a, Máximo Ávila-Cruz^a, Gabriela Yáñez-Pérez^a, Rubén Márquez-Máximo^a, Daniel Hernández-Andrade^a & Victoriano Covarrubias-Salvatori^b.

^a Facultad de Ingeniería, Colegio de Ingeniería Topográfica y Geodésica, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, San Manuel, Puebla, México. rogelio.ramos@correo.buap.mx, patricia.maximo@correo.buap.mx, victor.galindo@correo.buap.mx, maximo.avila@correo.buap.mx, gabriela.yanez@correo.buap.mx, ruben.marquezm@correo.buap.mx, daniel.hernandez@alumno.buap.mx

^b Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de Puebla, Huexotitla, Puebla, México. victoriano.covarrubias@puebla.gob.mx

Received: November 30th, 2020. Received in revised form: February 27th, 2021. Accepted: March 01st, 2021

Abstract

The present work seeks to contribute with a gravimetric analysis of La Malinche volcano, through as references 39 points defined within the protected natural area of its National Park, calculating free air and Bouguer anomalies, as well as the force of a liquid in an intermittent current, with the objective of determining the behavior of water and gravity with respect to the pronounced slope in the southwest of the building, through the EIGEN-6C4 gravimetric model. The results show Bouguer's anomalies with negative values and positive values for the free air anomalies, showing a behavior inversely proportional between the height of the point and the gravity. With respect to the analysis of the force of water, a behavior inversely proportional to the slope is shown, with an average value of 8919.062093 N/m³.

Keywords: Malinche; gravity; Bouguer's anomaly; free air anomaly; water force.

Análisis gravimétrico y cálculo de la fuerza de un líquido en el volcán La Malinche, Puebla-Tlaxcala, México

Resumen

El presente trabajo busca contribuir con un análisis gravimétrico del volcán La Malinche, tomando como referencias 39 puntos definidos dentro del área natural protegida de su Parque Nacional, calculando anomalías de aire libre y Bouguer, así como la fuerza de un líquido en una corriente intermitente, con el objetivo de determinar el comportamiento del agua y la gravedad respecto de la pendiente pronunciada en el suroeste del edificio, a través del modelo gravimétrico EIGEN-6C4. Los resultados muestran anomalías de Bouguer con valores negativos y valores positivos para las anomalías de aire libre, mostrando un comportamiento inversamente proporcional entre la altura del punto y la gravedad. Respecto al análisis de la fuerza del agua se muestra un comportamiento inversamente proporcional a la pendiente, con valor promedio de 8919.062093 N/m³.

Palabras clave: Malinche; gravedad; anomalía de Bouguer; anomalía de aire libre; fuerza del agua.

1. Introducción

El parque nacional Malinche queda comprendido en los territorios de los estados de Tlaxcala y Puebla como se muestra en la Fig. 1. De acuerdo con [6], el estado de Tlaxcala, ejerce su jurisdicción en 12 de sus municipios: Acuamanala de Miguel Hidalgo, Chiautempan, Contla de Juan Cuamatzi, Huamantla, Ixtenco, Mazatecochco de José Ma. Morelos, San Francisco Tetlanohcan, San José Teacalco, San Pablo del Monte, Santa Cruz Tlaxcala, Teolocholco,

Zitlaltepec de Trinidad Sánchez S. y el estado de Puebla en 4 municipios: Acajete, Amozoc de Mota, Puebla y Tapatlaxco de Hidalgo.

El volcán Matlalcueye es un estratovolcán andesítico neógeno-cuaternario en fase de reposo que se encuentra en la zona central oriente de México como parte del Eje Volcánico Transversal Mexicano (EVTM) [11]. La Malinche, es el nombre oficial, pero por cuestiones históricas se ha optado por Matlalcueye. El significado proviene de la lengua náhuatl: matlactli, color azul o verde oscuro, y cueitl, naguas o faldas es decir "La que tiene falda azul".

How to cite: Ramos-Aguilar, R., Máximo-Romero, P., Galindo-López, V., Ávila-Cruz, M., Yáñez-Pérez, G., Márquez-Máximo, R., Hernández-Andrade, D and Covarrubias-Salvatori, V. Análisis gravimétrico y cálculo de la fuerza de un líquido en el volcán Malinche, Puebla-Tlaxcala, México.. Boletín de Ciencias de la Tierra. Territorios del Futuro, 49, pp. 9-14, Agosto 2020 - Enero 2021

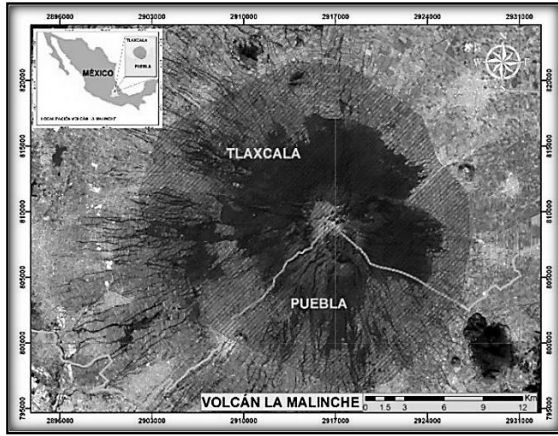


Figura 1. Localización geográfica del Volcán la Malinche.
Fuente: Los autores.

La actividad volcánica empezó hace unos 25 millones de años, durante el Oligoceno. La estructura actual data del período Cuaternario, hace aproximadamente 45 mil años. Ha tenido varias erupciones que la ha hecho elevarse y colapsar sucesivamente. Posee lavas dacíticas y andesíticas, por lo que es un volcán explosivo que ha tenido erupciones vulcanianas a ultraplínianas.

De acuerdo con [11], su cima a 4430 msnm, corresponde a la séptima cumbre más alta de la nación, La Matlalcueye, por ser un volcán, tiene forma de cono con extensas laderas en las que se levantan algunas cumbres menores, como los cerros Xaltónalli, Tlachichihuahutzi (La Tetilla) y Cuatlapanga.

Este volcán se considera activo en estado de reposo, lo que quiere decir que han pasado menos de 10,000 años desde su última erupción; algunos autores consideran que no presenta ningún tipo de actividad superficial que pueda asociarse a presencia de magma dentro del edificio volcánico [3,11], sin embargo, [1] identificaron entre el 1 de septiembre de 2012 y el 1 de mayo de 2013, un total de 11 sismos volcano-tectónicos de diferentes tipos. Algunos de los sismos de baja frecuencia se relacionan con la interacción fluido-roca y, por otra parte, se tienen algunos sismos de tipo tornillo, cuya amplitud máxima se tiene al comienzo del sismo y disminuye gradualmente, los cuales suelen ser precursores a actividad volcánica explosiva, por lo que sísmicamente, el volcán La Malinche está activo. Sin embargo, al considerarse en estado de reposo, diversas localidades se han asentado en los alrededores del volcán desde hace algunos siglos y han crecido considerablemente durante las últimas décadas, principalmente por la fertilidad de los suelos y por el potencial turístico que ofrece, no obstante, esta concentración poblacional alrededor de La Malinche, junto con las grandes dimensiones del volcán, lo convierten en uno de los volcanes con mayor riesgo en el país [5]. En este sentido el objetivo del trabajo es contribuir con datos y análisis gravimétricos del volcán la Malinche, así como contribuir con datos que determinan el gasto y la fuerza del agua en la corriente intermitente de mayor pendiente, esto a través del modelo gravimétrico EIGEN-6C4, y modelos matemáticos para determinar la aceleración de la gravedad normal y anomalías de aire libre y Bouguer, con la finalidad de modelar dichas anomalías y mostrar la relación de la

fuerza del agua sobre una corriente intermitente respecto su pendiente y la gravedad local.

2 Marco teórico

El conocimiento de campo anómalo de gravedad terrestre, de acuerdo con [8], se considera de vital importancia no solo para la geodesia, sino también para otras áreas de las geociencias, dado que este, permite ubicar al geoide respecto del elipsoide, así como, la determinación de la desviación de la vertical. A continuación, se analiza la diferencia entre el campo real y el campo normal de gravedad terrestre, siendo el potencial anómalo o potencial perturbador (T) la diferencia (ec. 1), entre el potencial de gravedad real (W) y el potencial de gravedad normal (U).

$$T(x, y, z) = W(x, y, z) - U(x, y, z) \quad (1)$$

Considerando la Fig. 2, el vector de la gravedad real (\vec{g}_p) en el punto P y el vector de la gravedad normal ($\vec{\gamma}_Q$) en el punto Q, entonces, la diferencia entre ambos vectores de gravedad se considera la llamada Anomalía de gravedad (Δg) (ec. 2).

$$(\Delta g) = \vec{g}_p - \vec{\gamma}_Q \quad (2)$$

La gravedad normal se calcula tomando como referencia el elipsoide de revolución como una aproximación de la gravedad, siendo para el GRS80, la fórmula de gravedad normal internacional adoptada por la Asociación Internacional de Geodesia (IAG) (ec. 3). Donde ϕ es la latitud y γ la gravedad normal dada en m/s^2 [8].

$$\gamma = 9.78032(1 + 0.0053025 \sin^2 \phi - 0.0000058 \sin^2 2\phi) \quad (3)$$

De acuerdo con lo que menciona [8,10], la gravedad varía principalmente en el sentido vertical, por lo que es necesario llevar el valor medido sobre la superficie terrestre al valor correspondiente en el geoide, siendo en ausencia de masas, considerada la llamada reducción por aire libre, que para efectos prácticos es utilizada la ec. (4), donde H es la altura y F la reducción por aire libre en mgal.

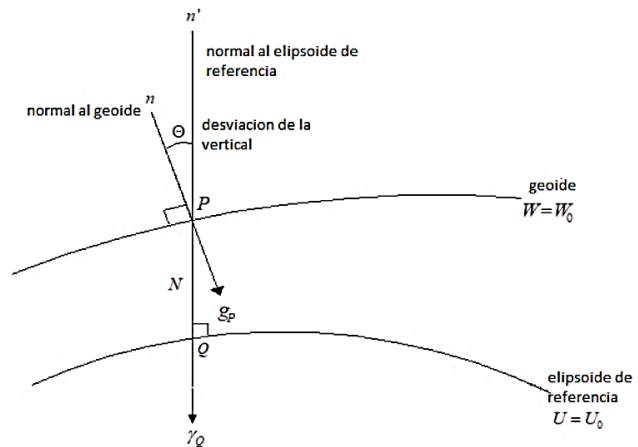


Figura 2. Vectores de gravedad normal y real.
Fuente: [10].

$$F = 0.3086 * H \quad (4)$$

Para obtener la correspondiente anomalía de aire libre (Δg_{AL}), de acuerdo con [2], se utiliza el valor de la gravedad observada (g_{obs}) más la respectiva reducción de aire libre (F) menos la gravedad normal (γ), expresada en la ec. (5).

$$\Delta g_{AL} = g_{obs} + F - \gamma \quad (5)$$

Para remover el efecto de las masas topográficas en la gravedad, se considera la distribución en una placa de altura constante, denomina Placa de Bouguer [2,8], siendo esta una placa horizontal infinita y con densidad constante para este análisis ($\rho = 2.67 \text{ gr/cm}^3$), representando a la reducción de Bouguer a través de la ec. (6).

$$A_B = 0.1119 * H \quad (6)$$

La correspondiente anomalía de gravedad de Bouguer es representativa de cambios de densidad a nivel cortical y de cambios de grosor en la corteza terrestre, siendo generalmente negativa, dada por la ec. (7).

$$\Delta g_B = g_{obs} - \gamma - F + A_B \quad (7)$$

2.1 Modelo EIGEN-6C4

El Centro Internacional de Modelos Globales Terrestres (ICGEM, por sus siglas en inglés), alojado en el Centro de Investigación Alemán para las Geociencias (GFZ, por sus siglas en alemán), coordinado por el Servicio Internacional de Campo de Gravedad (IGFS) de la Asociación Internacional de Geodesia (IAG), tiene por objetivo proporcionar información respecto a modelos de gravedad terrestre [9]. Tal es el caso del modelo europeo de gravedad mejorada de la Tierra mediante nuevas técnicas, en su cuarta versión EIGEN-6C4 [6], el cual es un modelo combinado de campo de gravedad de LAGEOS, GRACE y la misión GOCE, disponible en: <http://icgem.gfz-potsdam.de/> el cual es una de las mejores aproximaciones del campo de gravedad real, dada la combinación de misiones satelitales, mediciones terrestres y medición altimétrica derivadas del campo de gravedad [9, 3].

2.2 Fuerza del agua

La fuerza del agua es la cantidad de empuje que ejerce este líquido en dirección de la pendiente, para su cálculo el modelo matemático $F_1 = d * \cos m * gl$ ha sido utilizado para obtener los resultados [14], donde d es la densidad del agua (1000 Kg/m^3), m es la pendiente entre dos puntos, y gl la gravedad local [12] la cual puede calcularse mediante la corrección de aire libre y la aceleración de la gravedad normal, siendo $gl = \gamma - F$.

3. Materiales y métodos

Para el análisis gravimétrico se han determinado 39 puntos gravimétricos sobre la Malinche como se muestra en la Fig. 3, teniendo de ellos su latitud y longitud y altura elipsoidal, con la cual se ha transformado a altura ortométrica con software libre de INEGI (<https://www.inegi.org.mx/app/geo2/alturasgeoidales/>) de este modo se han aplicado los modelos matemáticos

propuestos, para calcular la aceleración de la gravedad normal, así mismo se ha hecho uso del modelo EIGEN-6C4 para obtener la gravedad observada sobre los puntos determinados (los valores que se utilizan están basados en la cuarta versión del modelo EIGEN-6C4, la versión más actual del modelo, por lo que en versiones posteriores los valores pueden presentar variación alguna), posteriormente se han calculado las reducciones de aire libre y Bouguer, para calcular sus respectivas gravedades y así las anomalías. Por practicidad se programó una hoja de cálculo, utilizando la base de datos del modelo IEGEN-6C4 para el cálculo automático de cada punto.

Para el cálculo de la fuerza del agua, se realizó en 13 puntos adicionales, en una corriente intermitente de la Malinche, correspondiente a la subcuencas RH18Ab, como se muestra en la Fig. 4. Para lo cual se ha calculado la pendiente y gravedad local.

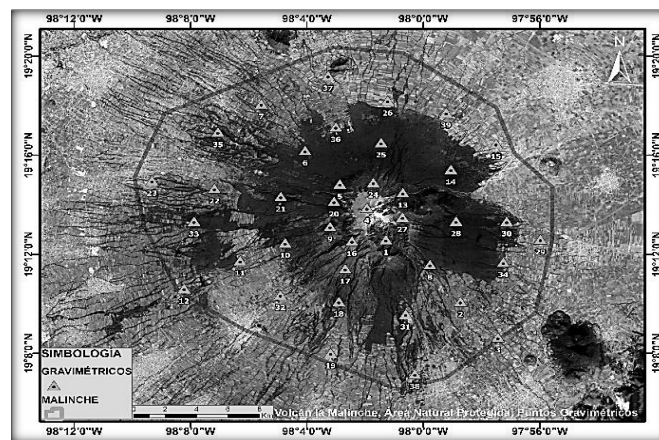


Figura 3. Localización de puntos gravimétricos sobre el volcán la Malinche. Fuente: Los autores.

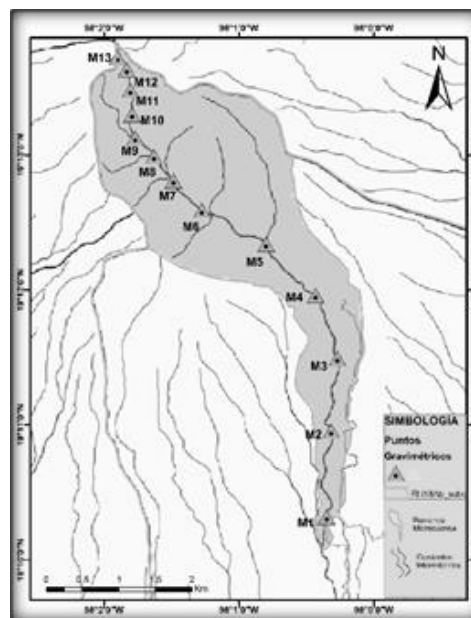


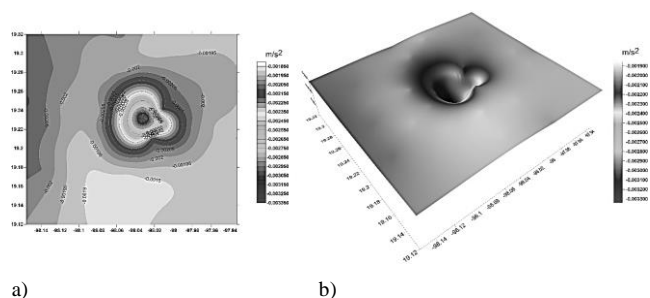
Figura 4. Puntos gravimétricos sobre corriente intermitente, de la microcuenca perteneciente a la subcuenca RH18Ab_subc. Fuente: Los autores.

Tabla 1.

Resultados del cálculo de gravedad normal y anomalías de aire libre y Bouguer

Punto	H	Latitud			Longitud		Gravedad Eigen-6C4 m/s ²	Gravedad Normal m/s ²	Anomalia de Aire Libre m/s ²	Anomalia de Bouguer m/s ²
		G	M	S	Decimal	Radianes				
1	4412	19	13	53.18	19.23143889	0.335651929	9.773847635	9.785924585	0.001538482	-0.003398546
2	3770	19	14	54.73	19.24853611	0.335950331	9.775888540	9.785934182	0.001588578	-0.002630052
3	3382	19	14	29.84	19.24162222	0.335829661	9.777114154	9.785930300	0.001620706	-0.002163752
4	3796	19	13	30.87	19.22524167	0.335543767	9.775789783	9.785921109	0.001583130	-0.002664594
5	3385	19	12	35.97	19.20999167	0.335277604	9.777124376	9.785912558	0.001657928	-0.002129887
6	3627	19	12	32.9	19.20913889	0.33526272	9.776347756	9.785912080	0.001628598	-0.002430015
7	3584	19	13	7.74	19.21881667	0.335431629	9.776475854	9.785917506	0.001618572	-0.002391924
8	3645	19	14	8.47	19.23568611	0.335726057	9.776291682	9.785926969	0.001613184	-0.002465571
9	3597	19	14	51.09	19.247525	0.335932684	9.776431221	9.785933614	0.001597949	-0.002427094
10	3005	19	17	9.32	19.28592222	0.336602842	9.778087125	9.785955191	0.001405364	-0.001957231
11	3203	19	16	31.39	19.27538611	0.336418952	9.777565499	9.785949267	0.001500690	-0.002083467
12	3077	19	15	26.45	19.25734722	0.336104114	9.777851042	9.785939130	0.001407534	-0.002035629
13	3126	19	13	20.99	19.22249722	0.335495867	9.777722334	9.785919570	0.001449600	-0.002048394
14	3126	19	11	35.46	19.19318333	0.334984243	9.777749683	9.785903140	0.001493379	-0.002004615
15	3255	19	11	25.82	19.19050556	0.334937507	9.777446266	9.785901640	0.001589556	-0.002052789
16	3088	19	12	28.33	19.20786944	0.335240564	9.777861764	9.785911368	0.001479964	-0.001975508
17	3064	19	14	20.48	19.23902222	0.335748283	9.777921218	9.785928841	0.001467882	-0.001960734
18	3077	19	16	12.1	19.27002778	0.336325432	9.777883132	9.785946255	0.001432499	-0.002010664
19	2859	19	18	12.85	19.30356944	0.336910844	9.778422813	9.785965120	0.001280567	-0.001918654
20	2834	19	17	43.72	19.29547778	0.336769618	9.778432260	9.785960566	0.001217418	-0.001953828
21	2781	19	16	28.29	19.274525	0.336403923	9.778492634	9.785948783	0.001126018	-0.001985921
22	2799	19	13	20.6	19.22238889	0.335493976	9.778475980	9.785919509	0.001194185	-0.001937896
23	2681	19	12	36.8	19.21022222	0.335281628	9.778687444	9.785912687	0.001048323	-0.001951716
24	2786	19	11	41.45	19.19484722	0.335013283	9.778495671	9.785904072	0.001189196	-0.001928338
25	2830	19	10	5.75	19.16826389	0.334549317	9.778399818	9.785889189	0.001244009	-0.001922761
26	2606	19	8	39.27	19.14424167	0.33413005	9.778835464	9.785875756	0.001001824	-0.001914290
27	2884	19	9	35.4	19.15983333	0.334402176	9.778323287	9.785884473	0.001338838	-0.001888358
28	2593	19	7	10.83	19.119675	0.333701281	9.778824551	9.785862033	0.000964517	-0.001937050
29	2961	19	10	6.29	19.16841389	0.334551935	9.778191829	9.785889273	0.001440202	-0.001873157
30	2652	19	8	1.19	19.13366389	0.333945433	9.778796724	9.785869845	0.001110951	-0.001856637
31	2831	19	10	21.93	19.17275833	0.33462776	9.778432963	9.785891704	0.001277725	-0.001890164
32	2762	19	11	45.17	19.19588056	0.335031319	9.778552359	9.785904650	0.001171240	-0.001919438
33	2507	19	10	37.89	19.17719167	0.334705136	9.778914641	9.785894185	0.000757058	-0.002048275
34	2643	19	13	20.36	19.22232222	0.335492813	9.7788673645	9.785919471	0.000910472	-0.002047045
35	2701	19	14	39.8	19.24438889	0.335877949	9.778620235	9.785931853	0.001023667	-0.001998752
36	2470	19	14	58.88	19.24968889	0.335970451	9.778968818	9.785934829	0.000656409	-0.002107521
37	2619	19	16	56.65	19.28240278	0.336541416	9.778761651	9.785953212	0.000890673	-0.002039988
38	2680	19	18	4.82	19.30133889	0.336871914	9.778697639	9.785963865	0.001004254	-0.001994666
39	2770	19	19	13.19	19.32033056	0.337203381	9.778513611	9.785974557	0.001087274	-0.002012356

Fuente: Los autores



a) b)

Figura 5. Modelación de anomalía de Bouguer donde el valor promedio es de $-0.002101469 \text{ m/s}^2$, el máximo de $-0.001856637 \text{ m/s}^2$ y el mínimo de $-0.003398546 \text{ m/s}^2$. a) Vista en planta del modelo de isóneas de anomalías de Bouguer, b) Modelo 3D de las anomalías de Bouguer.

Fuente: Los autores.

4. Resultados

Aplicando los modelos matemáticos, anteriormente mencionados, se han obtenido las anomalías de aire libre y

Bouguer sobre el volcán la Malinche, como se muestra en la Tabla 1.

La anomalía de aire libre, muestra variación en el sentido vertical con un promedio de los 39 puntos de $0.001297652 \text{ m/s}^2$. La anomalía de Bouguer, se presenta negativa en todos los puntos en promedio de $-0.002101469 \text{ m/s}^2$ dichas anomalías han sido modeladas en Surfer, como se muestra en la Fig. 5 y 6.

De acuerdo al modelo generado, concuerda que, en determinadas zonas montañosas, los valores de la anomalía de Bouguer son negativos por deficiencia de masa dada una compensación isostática.

El modelo de la anomalía de aire libre (Fig. 6), muestra la correspondiente reducción al geoide, siendo dicha anomalía, directamente proporcional a la altura es decir conforme se incrementa la altura también lo hacen las anomalías de aire libre.

En relación a la Fig. 4 (la cual muestra los puntos que se han utilizado para calcular la fuerza del agua sobre una corriente intermitente), han sido calculados como se muestra en la Tabla 2, de acuerdo al modelo matemático descrito en el marco teórico.

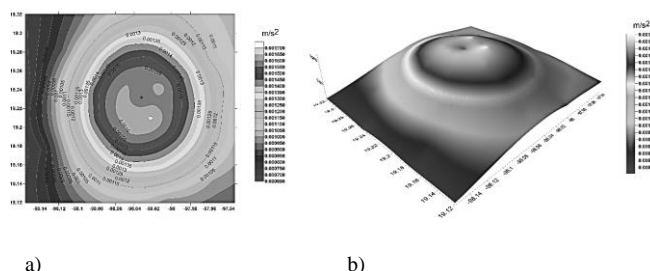


Figura 6. Modelación de anomalía de aire libre, donde el valor promedio es de $0.001297652 \text{ m/s}^2$, el valor mínimo de $0.000656409 \text{ m/s}^2$ y máximo de $0.001657928 \text{ m/s}^2$. a) Vista en planta del modelo de isolíneas de anomalías de aire libre, b) Modelo 3D de las anomalías de aire libre.

Fuente: Los autores.

Tabla 2.

Resultados del cálculo de la fuerza del agua sobre corriente intermitente al suroeste del volcán

Punto	Pendiente (m)	Cos (m)	Densidad del agua (Kg/m^3)	Gravedad local (m/s^2)	Fuerza del agua (N/m^3)
M13-M12	-0.566	0.844	1000	9.772775863	8248.225
M12-M11	-0.943	0.587	1000	9.773613815	5738.759
M11-M10	-0.871	0.644	1000	9.774503990	6295.299
M10-M9	-0.351	0.939	1000	9.774851091	9178.681
M9-M8	-0.235	0.972	1000	9.775105934	9505.994
M8-M7	-0.154	0.988	1000	9.775301769	9659.888
M7-M6	-0.104	0.995	1000	9.775475620	9722.598
M6-M5	-0.122	0.993	1000	9.775831252	9703.670
M5-M4	-0.090	0.996	1000	9.776093105	9736.143
M4-M3	-0.097	0.995	1000	9.776360317	9730.247
M3-M2	-0.071	0.997	1000	9.776574385	9751.885
M2-M1	-0.063	0.998	1000	9.776796823	9757.355

Fuentes: Los autores

La fuerza calculada se muestra de manera inversamente proporcional a la pendiente, es decir en cuanto mayor pendiente menor fuerza del agua. Dicho comportamiento puede estar relacionado a los puntos definidos respecto a su altura, pues a mayor altura, menor gravedad. De este modo, la corriente intermitente presenta un valor promedio de fuerza del agua de $8919.062093 \text{ N/m}^3$.

5. Discusión

En el volcán la Malinche no existe estado del arte respecto a algún análisis previo gravimétrico y fuerza del agua, sin embargo los resultados obtenidos muestran similitud con lo expuesto por [15], en el volcán Popocatepetl y los resultados gravimétricos en el bloque de Jalisco [3], obteniendo modelos semejantes en zonas volcánicas o de montaña.

6. Conclusiones

Dado el modelo IEGEN-6C4, el cual se ha considerado para este estudio como el campo real de gravedad, se ha logrado calcular las respectivas anomalías de gravedad, siendo las anomalías de aire libre la reducción de los valores del modelo al geoide en ausencia de masas, las cuales presentan valores positivos en todos los puntos calculados. Las respectivas anomalías de Bouguer muestran un modelo negativo ya que generalmente en zonas montañosas tienen

este comportamiento (dependiendo del tipo de roca). De este modo el presente trabajo, pretende contribuir con un análisis gravimétrico para determinar variaciones de densidad a nivel cortical, así como cambios de grosor en la corteza, no obstante, se requiere de un análisis más profundo para la determinación de posibles incrementos de aceleración de la gravedad lo cual puede propiciar escenarios como los flujos de lahar.

Finalmente, el cálculo de la fuerza del agua en la corriente intermitente de mayor pendiente, muestra que, a mayor pendiente menor fuerza del agua, siendo el factor contribuyente la gravedad, pues a mayor altura menor fuerza de gravedad, siendo el valor de la fuerza del agua de $8919.062093 \text{ N/m}^3$.

Agradecimientos

Agradecemos al cuerpo académico: BUAP-CA-344-Ciencias de la Tierra Aplicada a la Prevención de Desastres de la Facultad de Ingeniería de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla por su colaboración en este proyecto.

References

- [1] Angulo-Carrillo, J., Lermo-Samaniego, J.F., Martínez-González, J.A. y Valseca, R., La Malinche un volcán potencialmente activo. Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica XIX, 2013.
- [2] Arias-Cáceres, J., Determinación de la anomalía de Bouguer para una zona de Canadá. Paper Facultad de Ingeniería, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, November, 2015, 10 P. DOI: 10.13140/RG.2.1.5032.5840
- [3] Camacho, M. and Álvarez, R., Gravimetric analysis of the rifts and volcanic fields of the Jalisco block, Mexico. Tectonophysics, 791, art. 228577, 2020. DOI: 10.1016/j.tecto.2020.228577
- [4] Castro-Govea, R. and Siebe, C., Late Pleistocene-Holocene stratigraphy and radiocarbon dating of La Malinche volcano, Central Mexico. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 162(1-2), pp. 20-42, 2007. DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2007.01.002
- [5] Dávila-Lamas, E.E., Análisis de peligro por lahares en el volcán La Malinche y delimitación de los depósitos secundarios en el sector sur. Tesis de grado, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, [en línea]. 2020, 100 P. Disponible en: <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/15898/Tesis.pdf?sequence=1>
- [6] Förste, C., Bruinsma, S., Abrikosov, O., Flechtner, F., Marty, J.C., Lemoine, J.M. and Biancale, R., EIGEN-6C4-The latest combined global gravity field model including GOCE data up to degree and order 1949 of GFZ Postdam and GRGS Toulouse. Geophysical Research Abstracts Vol. 16, EGU2014-3707, EGU General Assembly 2014.
- [7] Hilda, Lic., Parque Nacional Malinche. Descripción Geográfica. [en línea]. 2020. Disponible en: <http://www.cge-tlaxcala.gob.mx/docs/malinche.pdf>
- [8] Hofmann-Wellenhof, B.H.M., Helmut Moritz Physical Geodesy. In Control Springer Wien New York, 2005.
- [9] Sinem-Ince, E. et al., (). ICGEM - 15 years of successful collection and distribution of global gravitational models, associated services and future plans. Earth System Science Data Discussions, 2019, pp. 1-61. DOI: 10.5194/essd-2019-17
- [10] García-López, R.V., Notas de geodesia física, 2013.
- [11] Macías-Vázquez, J.L. y Capra-Pedol, L., Los volcanes y sus amenazas. La ciencia para todos, (210). 1ª Ed. Fondo Cultural de Economía. México, 2005, 159 P.
- [12] Metrología MetAs, S.A., Intervalo de confirmación metrológica. Boletín electrónico La Guía MetAs. [en línea]. 5, pp. 2-5, 2002. Disponible en: <http://www.metas.com.mx>
- [13] Montero-García, I.A., Matlalucueye. El volcán del alma Tlaxcalteca. [en línea]. 2020. Académia.Edu. Disponible en:

https://www.academia.edu/19566088/Matlalcueye_El_volcán_del_alma_tlaxcalteca

- [14] Ramos-Aguilar, R., Máximo-Romero, P., Soto-Cruz, B.S., y Alcántara-Iniesta, S., Análisis geoestadístico de las barrancas Colorada y Quimichule del volcán Popocatepetl (México) como aporte a la prevención de desastres naturales. Investigaciones Geográficas, (47), pp. 67-82, 2014. DOI: 10.5354/0719-5370.2014.32996
- [15] Ramos-Aguilar, R., Máximo-Romero, P., Vázquez-García, M. de la C., Martínez-Ortiz, A.G., Hernández-Andrade, D. y Benítez-Ramírez, D.M., Estudio cartográfico del volcán Popocatepetl, Puebla, México: volumen edificio volcánico, aceleración de la gravedad y zonas de riesgo para la población. Contactos, Revista de Educación en Ciencias e Ingeniería, [en línea]. 115, pp. 38-52, 2020. Disponible en: <https://contactos.izt.uam.mx/index.php/contactos/article/view/5>

R. Ramos-Aguilar, es Dr. en Ciencias de la Tierra y Oceánicas, profesor investigador de la Facultad de Ingeniería, Colegio de Ingeniería Topográfica y Geodésica, de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México.
ORCID: 0000-0001-5660-6608

P. Máximo-Romero, es MSc. en Ingeniería Estructural, profesora investigadora de la Facultad de Ingeniería, Ciencias Básicas, de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México.
ORCID: 0000-0002-2698-842X

V. Galindo-López, es Dr. en Ciencias, profesor investigador de la Facultad de Ingeniería, Colegio de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México.
ORCID: 0000-0003-0112-2432

M. Ávila-Cruz, es MSc. en Ingeniería, profesor investigador de la Facultad de Ingeniería, Colegio de Ingeniería Topográfica y Geodésica, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México.
ORCID: 0000-0002-8024-2119

G. Yáñez-Pérez, es MSc. en Ingeniería, profesora investigadora, Facultad de Ingeniería, Ciencias Básicas, de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México.
ORCID: 0000-0002-4529-5995

R. Márquez-Máximo, es Dr. en Ciencias, profesor del Bachillerato Internacional 5 de Mayo, de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México.
ORCID: 0000-0002-7199-3404

D. Hernández-Andrade, es Estudiante del Colegio de Ingeniería Topográfica y Geodésica, Puebla, México.
ORCID: 0000-0001-6544-4460

V. Covarrubias-Salvatori, es Doctor en Ciencias, director e investigador del Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de Puebla, México.
ORCID: 0000-0001-5723-2601



Main geological processes and phenomena causing risk at Santiago de Cuba province, Cuba

Liber Galbán-Rodríguez ^a, Rafael Miguel Guardado-Lacaba ^b & Tomas Jacinto Chuy-Rodríguez ^c

^a Departamento de Ingeniería Hidráulica, Universidad de Oriente, Santiago de Cuba, Cuba. liberg@uo.edu.cu

^b Departamento de Geología, Universidad de Moa Dr. Antonio Núñez Jiménez, Ciudad de Moa, Holguín, Cuba. rguardado@ismm.edu.cu

^c Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas, Santiago de Cuba, Cuba. chuy@cenaiss.cu

Received: January 20th, 2021. Received in revised form: February 15th, 2021. Accepted: February 27th, 2021.

Abstract

The province of Santiago de Cuba now a day have a different hazard, vulnerability and risks conditions in front of the impact of geological processes and phenomena that influence on its social and economic development. This time is been made a review about the main topics of this issue from an actualized perspective, taking in consideration the recent research results.

Keywords: geological hazards; Santiago de Cuba; vulnerability; risk, phenomena.

Principales procesos y fenómenos geológicos conducentes a riesgos en la provincia Santiago de Cuba, Cuba

Resumen

La provincia Santiago de Cuba actualmente presenta distintas condiciones de peligro, vulnerabilidad y riesgos ante diversos procesos y fenómenos geológicos, los cuales inciden en su desarrollo social y económico. En este trabajo se realiza una revisión de las aristas fundamentales alrededor de esta temática desde una perspectiva actualizada de acuerdo con las investigaciones recientemente realizadas.

Palabras clave: peligros geológicos; Santiago de Cuba; vulnerabilidad; riesgos; fenómenos.

1. Introducción

El estudio y consideración de diferentes procesos y fenómenos geológicos (terremotos, deslizamientos y deslaves, inundaciones, erosión costera y continental, carso, etc.) es una tarea importante para la planificación física, el ordenamiento territorial, la reducción de los riesgos y desastres. En cuanto a terremotos, por ejemplo, no se puede predecir cuándo van a ocurrir, pero sí delimitar áreas de peligro, vulnerabilidad y riesgos donde puede haberlos en las próximas décadas, determinar el alcance de las sacudidas, diseñar nuevas construcciones resistentes y reforzar las antiguas, entre otras. En esta labor, la zonificación ingeniero geológica de las áreas más expuestas a ser impactadas por procesos y fenómenos geológicos es un instrumento indispensable para elaborar planes de reducción de desastres y para disminuir la vulnerabilidad de la población potencialmente afectada.

En la provincia Santiago de Cuba se observan daños provocados por la consideración inadecuada de distintos peligros geológicos en diferentes localidades. Muy significativo en el pasado siglo XX resultó la ocurrencia de un terremoto de 6.7 en la escala Richter el 3 de febrero de 1932 (Fig. 1).

Otros ejemplos más recientes confirman esta idea, basta citar el deslizamiento ocurrido en el año 2007 durante la remodelación y ampliación del nuevo acueducto de la ciudad de Santiago de Cuba en el tramo [21], el hundimiento de edificaciones en zonas conocidas por la presencia de suelos expansivos, entre ellas, el Hospital Clínico Quirúrgico “Juan Bruno Zayas” o algunos edificios y otras estructuras funcionales de la Sede “Julio Antonio Mella” de la Universidad de Oriente [13], las afectaciones a la carretera Granma por la fuerte erosión costera y deslizamientos en varios de sus taludes laterales [10], entre otros.

How to cite: Galbán-Rodríguez, L., Guardado-Lacaba, R.M., and Chuy-Rodríguez, T.J. Principales procesos y fenómenos geológicos conducentes a riesgos en la provincia Santiago de Cuba, Cuba.. DYNA, 49, pp. 15-25, Agosto 2020 - Enero 2021



Figura 1. Imágenes de daños ocasionados en la ciudad de Santiago de Cuba por el terremoto de 1932.

Fuente: Archivos del Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas. Cuba. Cortesía del Centro.



Figura 2. Ubicación geográfica de la provincia Santiago de Cuba, significando con un círculo blanco la ciudad cabecera.

Fuente: Obtenido por los autores.

Los elementos anteriormente expuestos señalan que la provincia de Santiago de Cuba está expuesta a procesos y fenómenos geológicos, cuyos efectos conducen a riesgos que pueden llegar a restringir el desarrollo económico y social del territorio; por cuanto se evidencia la necesidad imprescindible de continuar investigando esta situación.

La Provincia Santiago de Cuba se encuentra situada al sur de la región oriental de Cuba, entre los $19^{\circ}53'$, $20^{\circ}12'$ de latitud norte y los $75^{\circ}22'$, $77^{\circ}02'$ de longitud oeste, limitando al oeste con la provincia Granma, al norte con la provincia Holguín, al este con la provincia Guantánamo y al sur con el Mar Caribe (Fig. 2). Su capital es la ciudad de Santiago de Cuba, segunda urbe más poblada del país (más de 520 000 habitantes). [17]

Este territorio ocupa el décimo lugar en extensión entre las provincias cubanas con una superficie total de 6234,16 km² representando el 5,7% del total del país. Se divide en 9 municipios: Guamá, Santiago de Cuba, Palma Soriano, II Frente, III Frente, Songo la Maya, Contramaestre, San Luis y

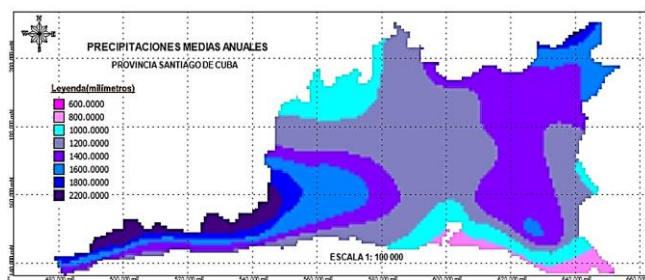


Figura 3. Imagen del mapa de precipitaciones medias anuales de la provincia Santiago de Cuba.

Fuente: [8]

Julio A. Mella. Su población actual como provincia sobrepasa el millón de habitantes. [17]

En lo referente al clima, Santiago de Cuba es una de las provincias más calurosas del país, con una temperatura máxima media de $32,3^{\circ}\text{C}$ y una mínima media de 23°C en la ciudad cabecera, la lluvia media total anual es de 1393,9 mm, en las montañas las temperaturas son más frescas y llueve más. [17] (Fig. 3).

El relieve de la provincia es variado. Hacia el noreste es semi-montañoso y accidentado, constituido por elevaciones jóvenes donde las pendientes sobrepasan el 25% en algunos casos y, hacia el noroeste es relativamente llano con desarrollo de llanuras aluviales y cuencas hidrográficas de interés económico. Gran parte del territorio de la provincia está cubierto por la Sierra Maestra con las mayores alturas de la isla (Pico Turquino, 1974 m; Pico Cuba, 1874 m y Pico Suecia, 1734 m), y por la Sierra de la Gran Piedra (loma de la Gran Piedra con 1226 m) (Fig. 4).

En las zonas montañosas, principalmente, de los municipios Guamá, la parte sur de III Frente y hacia el este del municipio Santiago de Cuba, las pendientes que sobrepasan el 50%, aspecto que favorece los fenómenos erosivos y de deslizamientos de tierra (Fig. 5). Solamente el 3% de la superficie total de la provincia está por debajo de la cota de 100 metros de altitud. La cuenca de Santiago de Cuba se enmarca como principal accidente hacia el centro sur de la provincia, donde se encuentran varios niveles de terrazas y mesetas escalonadas que parten desde la bahía de Santiago de Cuba (largo: 8,5km; ancho: 2,4km; profundidad: entre 8,8 y 13,7m) alrededor de la que se desarrolla la ciudad del mismo nombre, observando en su parte superior varias llanuras aluviales. [12]

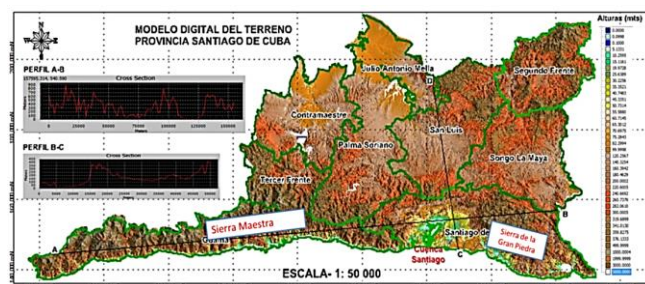


Figura 4. Imagen del Modelo Digital del Terreno (MDT) de la provincia Santiago de Cuba, significando su relieve.

Fuente: Obtenido por los autores.

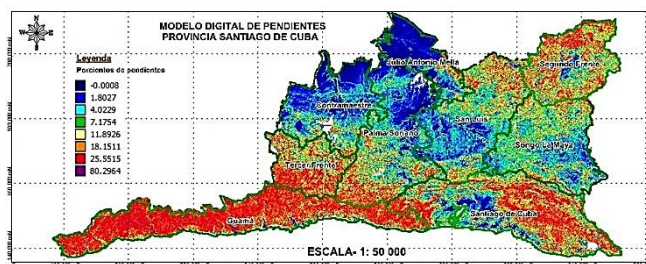


Figura 5. Imagen del modelo de pendientes de la provincia Santiago de Cuba a escala 1:50 000.

Fuente: Elaborado por los autores.

La hidrografía (tanto de la parte sureste como la suroeste de la provincia) está compuesta por ríos de trazos cortos, rápidos e intermitentes en la mayor parte del año, debido a la morfología del relieve, los cuales en temporada lluviosa arrastran una gran cantidad de sedimentos hacia las partes bajas de las cuencas, por lo que su actividad erosiva es significativa. Entre los ríos más importantes de la parte sur se citan el Chivirico, Sevilla, Paradas, San Juan, Daiquirí y Baconao. En el noroeste se encuentran las principales cuencas hidrográficas, en las que se ubican los dos mayores embalses de la provincia (Protesta de Baraguá y Carlos Manuel de Céspedes) correspondientes a los ríos Cauto y Contramaestre respectivamente (Fig. 6).

2. Metodología

Los elementos expresados con anterioridad señalan que en la provincia Santiago de Cuba existen limitaciones en el estudio ingeniero geológico, la evaluación de riesgos, el ordenamiento territorial, la planificación física y constructiva, la organización de acciones, su ejecución, seguimiento y control; por cuanto se evidencia la necesidad imprescindible de continuar investigando esta situación a fin de gestionar y reducir los riesgos geológicos en este territorio. Para cumplir con este objetivo fueron propuestos las siguientes acciones:

1. Identificar y caracterizar los procesos y fenómenos geológicos conducentes a riesgos en la provincia de Santiago de Cuba.
2. La zonación integral actualizada de peligros, vulnerabilidad y riesgos geológicos de la provincia Santiago de Cuba.

Para el desarrollo del trabajo investigativo se han empleado varios métodos de investigación, entre ellos: el histórico-lógico, el hipotético deductivo, la observación, análisis y síntesis, inducción-deducción, el método estadístico, el criterio de expertos, la cartografía ingeniero-geológica, entre otros. Además de emplear distintas técnicas



Figura 6. Imagen de la red hidrográfica de la provincia Santiago de Cuba.

Fuente: [14]

para el procesamiento de la información, entre las fundamentales se encuentran: la modelación, el análisis estadístico, la medición directa, entrevistas y encuestas.

Además fue necesario consultar, analizar y caracterizar un amplio volumen de información bibliográfica, la que ha sido referenciada y contextualizada oportunamente, incluyendo una consulta obligatoria a los documentos que rigen el marco legal de las investigaciones desarrolladas, además de distintos informes de proyectos, documentos, libros, artículos científicos y bases digitales que permitieron reunir la información básica y técnica para el logro de los resultados obtenidos.

3. Resultados obtenidos

Geológicamente, en los macizos montañosos del sur de la provincia predominan las rocas ígneas de tipo graníticas hacia el sureste, máficas alrededor de la cuenca Santiago, del tipo vulcanógenas y vulcanógeno-sedimentarias hacia el suroeste en distintas correlaciones, combinaciones alternantes y muy variables, tanto en sentido vertical como lateral.

Las rocas de tipo sedimentarias predominan sobre todo en la Cuenca Santiago (centro sur) y en la parte meridional de la provincia, observándose una alternancia de calizas biodetríticas, calizas limosas y limo-arcillosas, calcarenitas de matriz margosa, margas, aleurolitas y más subordinadamente arcillas, conglomerados y areniscas polimícticas con cemento calcáreo, formadas principalmente por vulcanitas; aunque también es posible encontrarlas metamorfosadas hacia el sureste principalmente [2]

Estratigráficamente, las formaciones más antiguas provienen del período Cretácico Superior, donde se representan las formaciones Manacal, La Picota, Santo Domingo, Mícara, entre otras que yacen en algunos casos discordantes. Éstas se ubican sobre todo en la parte norte y centro de la provincia con predominio de rocas sedimentarias, vulcanógenas y vulcanógeno sedimentarias, aunque se revelan algunas del tipo metamórficas en los contactos con los macizos de origen vulcanógeno y vulcano-sedimentarios hacia la parte sureste: Mármoles Jurásico, Edad: Pre-Cretácico Superior; Metamórficas Duarte, Edad: Pre-Campaniano (?), etc. [2].

Se encuentran formaciones del Paleógeno representadas abundantemente por formaciones pertenecientes al grupo El Cobre, ampliamente distribuidas a lo largo de la Sierra Maestra; las rocas más abundantes son: tobas, tobas aglomeráticas, lavas y lavas aglomeráticas de composición andesítica, andesidácica y dacítica, raramente riolítica, riolítica y basáltica. Con estas rocas se intercalan tufitas y calizas, además, se asocian a este complejo vulcanógeno-sedimentario cuerpos hipoabisales y diques de diversa composición. En su constitución también participan tobas cineríticas, tufitas, tobas calcáreas, calizas tobáceas, areniscas polimícticas, vulcanomícticas y gravacas. En el Paleógeno también se desarrollan formaciones sedimentarias de origen terrígeno y de ambientes marinos, entre las que se destacan la Formación Jaimanitas en la faja costera, Formación Cauto, terrígena ubicada hacia la parte centro oeste, y otras formaciones tales como Punta Imías, Bitirí, etc., [2]

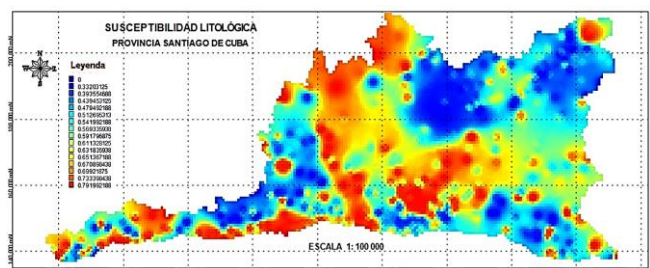


Figura 7. Imagen del modelo de susceptibilidad geológica provincia Santiago de Cuba.

Fuente: Elaborado por los autores.

Dentro de la evolución geológica del Neógeno se encuentran un grupo de formaciones sedimentarias fundamentalmente carbonatadas representadas por la Formación La Cruz (periferia de la bahía de Santiago de Cuba), Formación San Luis, Formación Camarones y además, otras predominantemente terrígenas como la Formación Farallón Grande, Formación Gran Tierra y Formación Puerto Boniato. Las formaciones más recientes, predominantemente sedimentarias, pertenecen al Cuaternario y se desarrollan en forma discontinua en pequeñas áreas de la cuenca de Santiago de Cuba; representadas en las formaciones Camarocito y Maya, desarrollándose depósitos arrecifales que alternan con episodios de intenso aporte de materiales clásticos terrígenos. [2]

Estudios recientes permitieron modelar la susceptibilidad litológica de estas formaciones rocosas ante el peligro que representan los distintos procesos y fenómenos geológicos que se desarrollan en la provincia, sobre todo en cuanto al comportamiento de los horizontes estratigráficos superiores, que reciben y transmiten con mayor facilidad las ondas sísmicas a las edificaciones y otras infraestructuras ubicadas sobre el terreno (Fig. 7).

Estudios realizados en la región meridional del oriente de Cuba plantean que la geomorfología estructural, los sistemas de fallas y las condiciones litológico estratigráficas, así como la evolución del oriente cubano; son elementos que determinan las condiciones sismotectónicas de esta región y por consiguiente, la manifestación de distintos peligros geológicos [15]. A partir de este análisis los procesos y fenómenos geológicos fundamentales que generan afectaciones a la sociedad y el medio ambiente en Santiago de Cuba son los sismos, distintos procesos erosivos, los deslizamientos, el carso, las inundaciones inducidas por intensas lluvias, las inundaciones costeras y la presencia de suelos expansivos. De forma ampliada a continuación se exponen varios elementos que así lo demuestran.

4. Discusión de resultados

Desde el punto de vista sismotectónico la provincia Santiago de Cuba está situada al borde de los límites sur de la placa Norteamericana y norte de la placa Caribe, es interceptada por numerosas estructuras tectónicas, varias de las cuales determinan los límites de bloques con diferente dinámica en las zonas sismogénicas de la región oriental del país. En particular, se destaca el tipo de sismicidad conocida como de entre placas, vinculada a la estructura Bartlett-Caimán (zona sismogénica oriente) la cual se caracteriza por ser un sistema de fallas transformantes abierto con una fosa en su centro (Fig. 8).

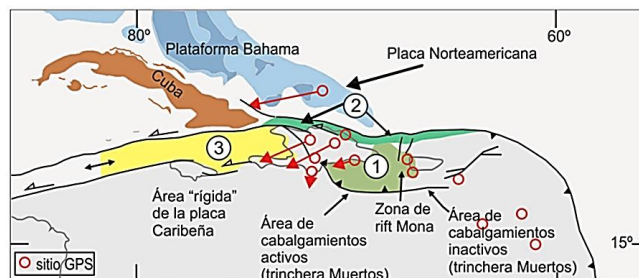


Figura 8. Mapa del Caribe donde se destacan las placas, sus límites y movimientos vectoriales predominantes. 1- microplaca La Española 2- microplaca Septentrional, 3- Microplaca de Gonave.

Fuente: [11]

Las investigaciones sismológicas de Cuba sitúan a la provincia Santiago de Cuba como la de mayor peligro sísmico del territorio nacional. Más del 60% de los sismos perceptibles y fuertes reportados en el país han tenido su epicentro en esta provincia, registrándose 20 reportes de sismos fuertes (Intensidad 7.0 MSK) en el sector comprendido entre las localidades de Chivirico a Baconao, siendo sacudida por más de 1000 sismos perceptibles desde el año 1528 hasta la fecha [3]. A tales efectos se recuerdan los grandes terremotos ocurridos el 3 de febrero de 1932 y el 8 de agosto de 1947, donde se reportaron serios daños en la ciudad de Santiago de Cuba, fundamentalmente en los alrededores de la bahía [5]. Es de especial interés significar que dos de los sismos fuertes ocurridos en Santiago de Cuba, produjeron intensidad $I=9.0$ MSK en 1766 y 1852, reportándose en ambos considerables daños en toda la región oriental. [10]

Para la evaluación del peligro sísmico se considera que las principales afectaciones están relacionadas con las fallas activas, constituyendo zonas débiles en superficie donde se producen incrementos de la intensidad sísmica, y donde también se pueden producir movimientos diferenciales por constituir límites de bloques con diferente dinámica, así como por servir de guía para ondas desde el foco sísmico o hipocentro; en ellas el potencial de daños ante los terremotos puede ser intensificado. (Fig. 9).

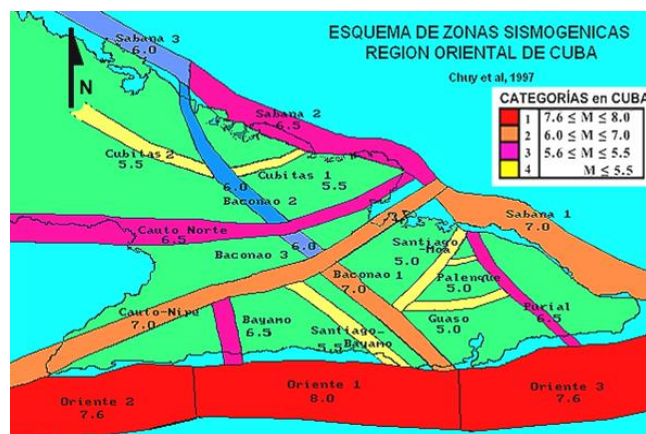


Figura 9. Esquema de zonas sismogénicas de la región oriental de Cuba.

Fuente: [4]

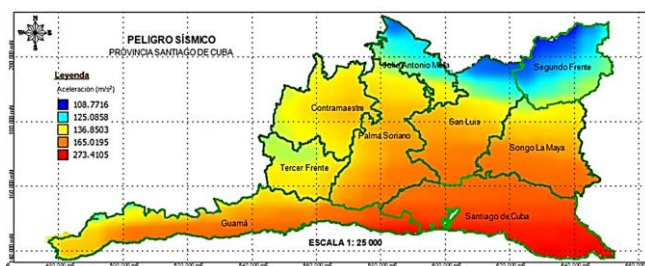


Figura 10. Imagen del modelo de peligrosidad sísmica provincia Santiago de Cuba.

Fuente: Elaborados por los autores.

La interpretación de los datos sísmicos de la provincia, señalan que las áreas de mayor peligro sísmico se encuentran al sur de la provincia, en los municipios costeros Guamá y Santiago de Cuba (Fig. 10).

El nivel de estudio alcanzado en la provincia hace posible realizar evaluaciones sobre la licuefacción como fenómeno geológico secundario, identificando los mayores potenciales en la zona costera cercana al límite sur de la placa Norteamericana, donde se encuentran sedimentos aluviales poco consolidados en que además, el nivel freático se encuentra a unos pocos centímetros de profundidad en las desembocaduras de los ríos y casi toda la zona baja de los alrededores de la bahía de Santiago de Cuba; esto significa que las construcciones y obras de infraestructura situadas en el entorno tienen un alto grado de vulnerabilidad ante la ocurrencia de la licuefacción del terreno. Por otro lado, se considera como peligro moderado a la licuefacción su incidencia en zonas bajas adyacentes a la cuenca del río Cauto, que cubre la parte meridional de la provincia, sobre todo para sismos de magnitudes superiores a los 7 grados en la escala Richter [12]. (Fig. 11 y Fig. 12)

El peligro de afectaciones por tsunamis en la región del Caribe es bajo, con reportes de alturas de olas de hasta 6m, sin embargo, por esta causa han perecido más de 3503 personas entre 1842 y 1946 (Tabla 1) [18].

Distintos estudios exponen otros eventos de tsunamis y refieren que los orígenes potenciales de un tsunami en el Mar Caribe y áreas adyacentes son terremotos, deslizamientos submarinos y actividad volcánica submarina (Fig. 13). [22]

Se plantea además, que existen probabilidades de ocurrencia de tsunamis en el área del Caribe que podrían afectar a las localidades situadas en las proximidades de las zonas costeras de la provincia Santiago de Cuba, localizando

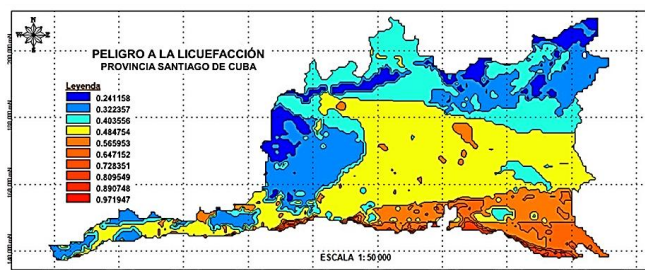


Figura 11. Imagen del mapa de peligro a la licuefacción provincia Santiago de Cuba (abajo).

Fuente: [12]



Figura 12. Afectaciones que se produjeron en la zona de la Alameda (Avenida Jesús Menéndez), en la ciudad de Santiago de Cuba durante el terremoto del 3 de febrero de 1932, causadas probablemente por la licuefacción del terreno.

Fuente: Archivos CENAI.

Tabla 1.
Tsunamis en el Caribe.

Fecha	Lugar	Victimas
1842	Haití	300+
1853	Venezuela	600+
1867	Islas Vírgenes	23
1882	Panamá	75+
1906	Jamaica	500
1918	Puerto Rico	140
1946	República Dominicana	1790
1946	República Dominicana	75
TOTAL		3503

Fuente: [18]

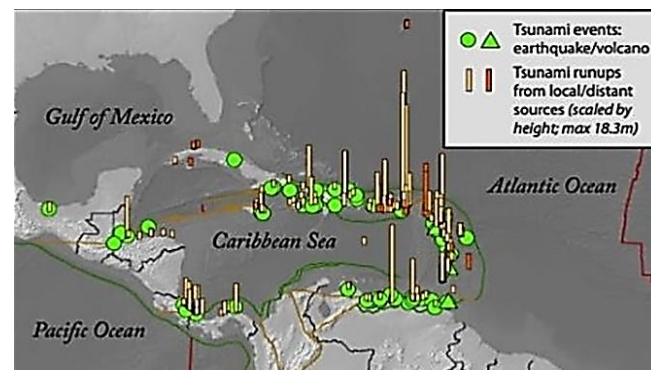


Figura 13. Mapa de impactos de tsunamis en el Caribe 1493-2013.

Fuente: [22]

sus focos generadores a lo largo del sistema de fallas Bartlett-Caimán, los que estarían originados, fundamentalmente, por terremotos o deslizamientos submarinos en el lado sur del sistema, desde Islas Caimán, pasando por el norte de Jamaica, hasta la costa norte de Cabo Haitiano, o en la parte norte hacia las proximidades de Islas Caimán. Todas estas estimaciones se suceden en los límites de la microplaca Gonave, donde también tienen lugar complejos procesos geológicos de hundimiento en el centro y formación de la Fosa Bartlett,

corrimiento y apertura, además de presión de límite de placas en sus extremos este y oeste, razones que en conjunto favorecen la posible ocurrencia de terremotos submarinos y tsunamis de moderada magnitud (Fig. 14) [12]. Estos elementos expuestos complican la situación de peligro sísmico de la provincia Santiago de Cuba, al poseer varias comunidades en zonas bajas próximas a las costas.

Otras posibilidades más remotas de impacto de tsunamis, podrían estar ocasionadas por terremotos submarinos en los límites de la Placa Caribe con el Sur de Venezuela, Colombia y Panamá, además de otros en la parte este de Centroamérica, sobre todo para sismos de magnitudes superiores a 8 en la escala Richter; en esta área en el pasado se registraron eventos geológicos de este tipo que impactaron la costa norte de Venezuela y Colombia, además de otras islas cercanas del Caribe insular (Fig. 15).

La erosión constituye uno de los principales peligros geológicos de la provincia Santiago de Cuba, valorándose como elevada debido a la intensidad de los factores condicionantes

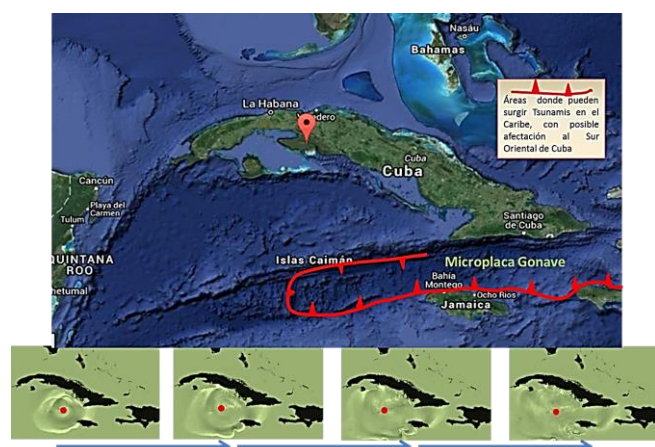


Figura 14. (Arriba) Imagen satelital del Caribe donde se destaca Cuba y se significa las áreas donde podrían surgir Tsunamis de moderada magnitud con posible afectación a la costa sur oriental de Cuba (Debajo) Secuencia de modelación de un posible Tsunami en la región del Caribe interior al norte de la placa de mismo nombre
Fuente: Elaborado por los autores. Y [9].

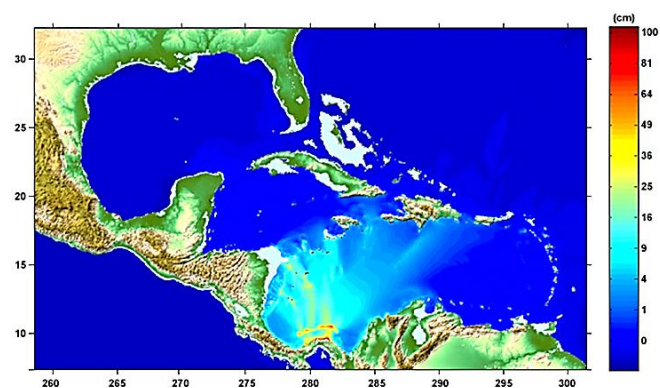


Figura 15. Modelo de la amplitud de las olas generadas por el terremoto de 1882 cerca de Panamá.
Fuente: [16]

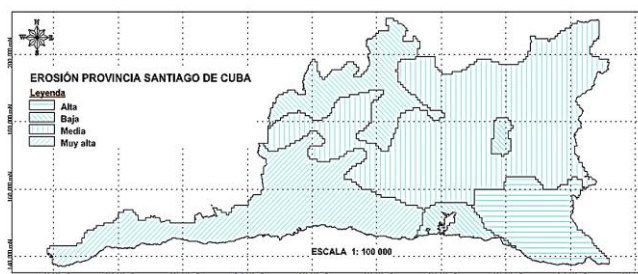


Figura 16. Imagen del modelo de erosión fluvial de la provincia Santiago de Cuba.
Fuente: [8]

de la erosión, entre estos, intensa capacidad erosiva de los suelos, la presencia de rocas vulcanógeno sedimentarias medianamente compactadas con una potencia considerable, sobre todo hacia el sur, un elevado factor del relieve manifestado por sus pronunciados ángulos de inclinación y longitud de las pendientes, y poco desarrollo de la vegetación [19]. En la provincia predomina la erosión que se genera durante las temporadas de lluvias (Fig. 16).

El problema de la erosión fluvial y deposición de suelos cohesivos por acción hídrica es importante para la provincia Santiago de Cuba desde el punto de vista de la ingeniería, porque está relacionado entre otros elementos, con la estabilidad de canales en lechos cohesivos, con la estabilidad de las obras de drenaje superficial (puentes, alcantarillas, cunetas, etc.), con el mantenimiento de profundidades mínimas en estuarios (donde el sedimento se deposita en mayor medida) y con la vida útil de los embalses. En la provincia existen distintas afectaciones por fenómenos erosivos, sobre todo a las obras ingenieras ubicadas en zonas de montaña (caminos, carreteras, puentes, etc.) de los municipios Palma Soriano, San Luis, II Frente, III Frente, Guamá, La Maya y Santiago de Cuba. Se observan dentro de las más significativas: [12]

- Daños ocasionados en el vial y los puentes de la carretera Granma por efecto de socavación, provocando en algunos casos la inhabilitación parcial o total de los mismos (Fig. 17).
- Reducción de la vida útil de embalses por efecto de azolve, encontrando como casos significativos los embalses Chalons y Charco Mono, ambos en el municipio Santiago de Cuba.
- Daños a caminos, viales y sus obras de drenaje en la parte montañosa de la cuenca del río Cauto en el municipio Palma Soriano; así como en la cuenca de los ríos Mícara, Baconao, Contramaestre, Caoba, Sevilla, La Plata, entre otros.



Figura 17. Afectaciones estructurales en puentes de la carretera Granma por efecto de erosión por socavación en los ríos que la atraviesan (Caoba, Sevilla, La Plata, entre otros de la vertiente sur).
Fuente: Fotografías tomadas por los autores.

La abrasión costera (también llamada erosión costera) está presente específicamente en los municipios costeros de Guamá y Santiago de Cuba, donde se desarrolla la actividad económica principal y se concentra la mayor cantidad de habitantes de la provincia; allí se ubican las principales instalaciones portuarias, industrias, frigoríficos, instalaciones turísticas, la ciudad de Santiago de Cuba, entre otras. Los trabajos de campo realizados durante la investigación, confirmaron que, la abrasión costera está condicionada por la escasa extensión de plataforma continental y arrecifes coralinos; así como, a la existencia de rocas medianamente compactadas del tipo sedimentarias y vulcanógeno sedimentarias que facilitan la acción erosiva de las olas sobre ellas; además de un escaso desarrollo de la vegetación costera.

La actividad erosiva en las costas Santiagueras, también está condicionada por la acción de los ríos que desembocan en el área, todos son ríos de montaña con trazo corto e intermitentes. En sus desembocaduras crean generalmente una barra litoral arenosa cerrando los estuarios, y creando en algunos casos condiciones para la proliferación de pantanos litorales y manglares de bajo desarrollo, así como lagunas costeras intermitentes, con la excepción de la Laguna Baconao al este en el río homónimo, que tiene una extensión mayor y permanece llena todo el año (Fig. 18).

La abrasión costera en Santiago de Cuba, y a partir de la condición de una plataforma submarina poco desarrollada, propicia la formación de playas de arenas gruesas y guijarros redondeados compuestos por rocas vulcanógenas y vulcano-sedimentarias típicas en la región, aunque en algunos casos se forman de arenas finas poco desarrolladas provenientes de las formaciones calcáreas cuaternarias, que cerca de la costa se encuentran generalmente carsificadas. Por otro lado, en las costas de la provincia de Santiago de Cuba se desarrollan distintos niveles de terrazas costeras de material calizo y margoso calizo, sobre todo en el municipio Santiago de Cuba, en ellas se ubican distintas infraestructuras que actualmente se encuentran amenazadas por fenómenos erosivos (Fig. 19).

Además de las formas de relieve costero ya mencionadas condicionadas por la erosión (playas, barras litorales, lagunas litorales, pantanos), también se pueden encontrar cuevas, dientes de perro, bahías, ensenadas, distintos niveles de terrazas marinas, islotes (conocidos como cayos) y dos largas fechas litorales: entre la Playa Casonal y la zona de Baconao (al este en el municipio Santiago de Cuba); y entre el río Sevilla y la playa Costa Morena (al oeste en el municipio Guamá). En algunas ocasiones estas formas de la morfología costera condicionada por la abrasión aparecen también combinadas. Esta abrasión costera provoca daños afectando distintas infraestructuras construidas, sobre todo en temporada ciclónica e invernal por el impacto de grandes



Figura 18. Imagen satelital de la parte final del lado Este de la zona costera de Santiago de Cuba, donde se encuentra la Laguna Baconao.
Fuente: Elaborada por los autores.



Figura 19. Imagen la Playa Bucanero, ubicada naturalmente en un ambiente costero caracterizado por el desarrollo del carso sobre la formación geológica Jaimanitas al este del municipio Santiago de Cuba.
Fuente: Fotografía tomada por los autores.



Figura 20. Imágenes de áreas afectadas por efecto de la acción erosiva combinada del viento, el mar y las lluvias en temporada ciclónica: Carretera Granma en el municipio Guamá (A y B); Hotel Bucanero (C y D).
Fuente: Fotografías tomadas por los autores.

olas generadas por las tormentas y el viento. Existen ejemplos que así lo demuestran, entre ellos, las afectaciones a la estructura del vial de la carretera Granma en el municipio Guamá, las provocadas en las viviendas e infraestructura construida en la zona costera de Siboney, además de otras al Hotel Bucanero en la zona de Juraguá en el municipio Santiago de Cuba (Fig. 20).

Los deslizamientos de tierra tienen su aparición de manera puntual y localizada en la provincia, aunque la susceptibilidad a este fenómeno es elevada por las condiciones ingeniero geológicas presentes en el territorio. Entre las causas principales que dan lugar a la formación de los deslizamientos se encuentran: las cargas hidrostáticas e hidrodinámicas y las sísmicas, el debilitamiento de la resistencia de las rocas a consecuencia del cambio de su estado físico (al humedecerse en temporada lluviosa, hincharse, descompactarse o cambiar la constitución natural), la variación del estado tensional de las rocas en los taludes producto a las acciones constructivas y los efectos exteriores que originan las

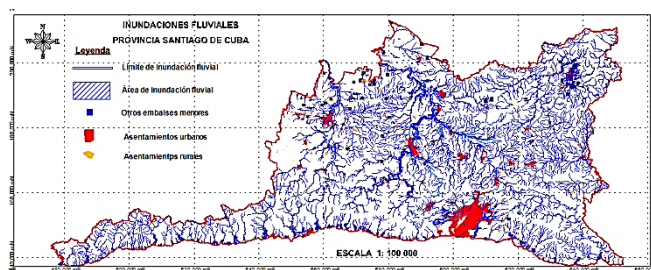


Figura 24. Imagen del mapa de peligro a inundaciones fluviales de provincia Santiago de Cuba.

Fuente: [7]

Las inundaciones en la provincia ocurren con mayor frecuencia en los municipios II Frente, Contramaestre, Palma Soriano, Guamá y Santiago de Cuba [7] (Fig. 24).

La causa fundamental de las inundaciones fluviales en Santiago de Cuba son las fuertes lluvias, sobre todo en la temporada ciclónica; pero no todas las inundaciones graves ni los daños provocados por estas y por las crecidas de los ríos tienen como causa a este fenómeno. Áreas de la ciudad cabecera como Yarayó, Avenida Jesús Menéndez, San Juan, Los Cangrejitos y Planta Eléctrica (por solo citar algunos ejemplos), se han visto afectadas con inundaciones frecuentes debido, fundamentalmente, al cambio en los usos de suelo y al deficiente drenaje de alcantarillado. [6]

Los factores más comunes de vulnerabilidad están relacionados con la obstrucción de canales de desagüe por residuos y fragmentos generados por la actividad humana [23], la insuficiente evaluación y gestión de estos fenómenos en los procesos de planeación y ordenamiento al no atender correctamente las valoraciones realizadas por especialistas en la provincia, y con el insuficiente sistema de alcantarillado y evacuación de residuos líquidos, no solo de la ciudad cabecera, sino de toda la provincia en general, el cual necesita ser reparado, ampliado y reacondicionado para responder con eficiencia a las exigencias del desarrollo actual del territorio.

Los municipios Santiago de Cuba y Guamá son afectados por inundaciones costeras, registrándose daños materiales a la actividad agrícola, turística, viales, puentes, viviendas, y distintas comunidades cercanas a la línea de costa, sobre todo en temporada ciclónica cuando se combina la acción erosiva del mar, el viento y la lluvia, denotando la consideración y gestión inadecuada de este peligro. Las afectaciones más recientes ocurrieron en el municipio Guamá durante el paso del huracán Sandy en octubre 2012. Estos daños generalmente están asociados a la combinación de fenómenos relacionados a las penetraciones del mar y las inundaciones fluviales en zonas costeras, donde la diferencia de densidad entre el agua del mar y la de los ríos provoca un crecimiento de la columna de agua hacia el interior de la zona en los estuarios.

Por otro lado existen áreas, sobre todo en los límites de la bahía de Santiago de Cuba y otras áreas costeras puntuales, donde se desarrollan zonas pantanosas. Las observaciones realizadas durante la investigación confirmaron que este fenómeno puede afectar la estabilidad del terreno y de las infraestructuras de la planta eléctrica “René Ramos Latour”, la refinería de petróleo “Hermanos Díaz” y otras ubicadas en estas áreas. Este es un elemento que incrementa las

potencialidades de manifestación de la licuefacción del terreno como fenómeno geológico secundario.

En la provincia Santiago de Cuba existen varios factores antrópicos que incrementan la susceptibilidad de los suelos, las aguas superficiales y subterráneas ante distintos procesos de contaminación, entre estos se focalizan los siguientes:

- Desarrollo de actividades constructivas y agrícolas en las cuencas de los ríos principales donde se explota el agua para el abastecimiento a la población: 1. Río San Juan, donde se encuentra el acuífero de mayor importancia económico-social de la provincia y se obtiene agua subterránea para abastecimiento a gran parte de la población de la ciudad de Santiago de Cuba. En la zona baja de El Caney y el área de San Juan ha proliferado la construcción de fosas de desechos fecales humanos sin sello en el fondo e improvisación de desagües en zonas donde no existen alcantarillados; además de la realización de actividad agrícola cargada de fertilizantes cuya aureola de dispersión permite la entrada al manto freático de elementos nocivos para la salud. 2- Río Cauto, donde se encuentran varios asentamientos humanos en su cauce, además de la presa más grande de la provincia y otra de menor categoría (es el río más largo de Cuba y tiene fuera de Santiago de Cuba otros embalses y asentamientos humanos).
- La generación de desechos industriales que van a parar al subsuelo, ríos y bahía de Santiago de Cuba, donde se dirige una carga contaminante considerable de las industrias y población de sus alrededores. [20]

Los elementos analizados evidencian insuficiencias en la gestión de riesgos geológicos en la provincia Santiago de Cuba, que hacen necesario transformar las estrategias de trabajo, disminuir la vulnerabilidad de la población, y realizar continuamente un conjunto de acciones encaminadas a reducir los desastres.

6. Conclusiones

Geológicamente en la provincia Santiago de Cuba predominan formaciones abundantes en rocas vulcanógeno y vulcanógeno sedimentarias en las áreas de montaña, pudiéndose encontrar formaciones sedimentarias en la cuenca Santiago y hacia la parte noroeste principalmente; elementos que conjuntamente a las condiciones geomorfológicas y sismotectónicas de la provincia, condicionan la magnitud de los distintos procesos y fenómenos geológicos que aquí tienen lugar.

Los peligros geológicos mayormente generadores de riesgos son los sismos, los deslizamientos, la erosión continental y costera, las inundaciones, el carso y distintos procesos antrópicos, cuya gestión inadecuada ha ocasionado manifestaciones palpables de daños en distintas localidades del territorio.

Los elementos analizados evidencian la necesidad de dirigir las herramientas de gestión hacia el mejoramiento continuo del diagnóstico de riesgos, la reducción de la vulnerabilidad y los efectos de los distintos procesos y fenómenos geológicos en la provincia Santiago de Cuba; y por consiguiente, la uniformidad de acciones tanto nivel de municipios como de la provincia.

Bibliografía

- [1] Cabrera-Castellanos, M., Santos-Hernández, R.M., Mapa Geomorfológico del territorio marino y costero de Cuba a escala 1:1000 000. Segunda Convención Cubana de Ciencias de la Tierra, GEOCIENCIAS'2007. Memorias, ISBN: 978-959-7117-16.2. La Habana, Cuba. [en línea]. 2007. Disponible en: http://www.redciencia.cu/geobiblio/paper/2007_geologia.pdf
- [2] Carrillo, D., Echavarría, B., Castellanos, E., Triff, J. y Núñez, K., Léxico estratigráfico de Cuba. Instituto de Geología y Paleontología. La Habana, Cuba. [en línea]. 2009. Disponible en: <https://es.scribd.com/document/403330317/LEXICO-ESTRATIGRAFICO-DE-CUBA-pdf#download>
- [3] Chuy-Rodríguez, T.J., Macrossísmica de Cuba y su aplicación en los estimados de peligrosidad y microzonación sísmica. Tesis Doctor en Ciencias Geofísicas. Fondos del CENAIIS e Instituto de Geofísica y Astronomía, La Habana, Cuba. [en línea]. 1999, 273 P. Disponible en: <http://www.cenais.cu/strong/1906/doc/TESIS%20DOCTORAL-Tom%C3%A1s%20Chuy.pdf>
- [4] Chuy-Rodríguez, T.J., Despaigne-Longchamp G., González-Simón, L., Nuevas investigaciones sismológicas en Cuba. 1ª ed. Fondos del CENAIIS e Instituto de Geofísica y Astronomía. La Habana, Cuba. 1997.
- [5] Chuy-Rodríguez, T.J., Despaigne-Longchamp, G. y González-Simón, L., Nuevas investigaciones sismológicas en Cuba, 2da ed. Fondos del CENAIIS e Instituto de Geofísica y Astronomía. La Habana, Cuba. 2002.
- [6] Chuy-Rodríguez, T.J., Rosabal-Domínguez, S., Zapata-Balanqué, J.A., Gómez, J., Oliva-Álvarez, R., García-Peláez, J. y Rivera, Z., Amenazas Municipio Santiago de Cuba. Proyecto caracterización e impacto de amenazas naturales extremas en Santiago de Cuba. Archivo CENAIIS. Santiago de Cuba, Cuba, 2005.
- [7] Colectivo de Autores. Mapa de peligrosidad por inundaciones costeras provincia Santiago de Cuba. Taller de trabajo para establecer los límites de las áreas por inundaciones costeras, por penetración del mar e inundaciones por intensas lluvias en los municipios costeros Guamá y Santiago de Cuba. MEGACEN - IDICT - CIES - CENAIIS - CITMA Santiago de Cuba, Dirección provincial de planificación física, GEOCUBA oriente sur, Inst. Pedagógico Frank País García. Archivo CENAIIS.CITMA. Santiago de Cuba, Cuba, 2010.
- [8] Colectivo de autores. SIG de la Base nuevo Atlas Nacional de Cuba, escala 1:100 000. CITMA. La Habana, Cuba, 2002.
- [9] DCRC-UnivTohoku. Proyecto de microzonación sísmica de la República de Cuba con el empleo de herramientas de modelación. Archivos CENAIIS. Santiago de Cuba, Cuba, 2003.
- [10] Fernández-Melián A., et al., Atlas de peligros naturales del municipio Guamá: proyecto contribución a la disminución de la vulnerabilidad de las comunidades por eventos geológicos en el municipio Guamá. Archivo CENAIIS. Santiago de Cuba, Cuba, 2002.
- [11] Galbán-Rodríguez, L. y Guardado-Lacaba, R., Modelación del peligro a deslizamientos en el Municipio Santiago de Cuba considerando el peso de las variables determinantes. Revista del Museo Argentino de Ciencias Naturales, [en línea]. 18(1), pp. 89-99, 2016. ISSN: 1853-0400. Disponible en: <http://revista.macn.gob.ar/ojs/index.php/RevMus/article/view/438/421>
- [12] Galbán-Rodríguez, L., Procedimiento para la gestión y reducción de riesgos geológicos en la provincia Santiago de Cuba. Tesis de Dr., Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. Cuba. [en línea]. 2014. Disponible en: <http://eduniv.mes.edu.cu/index.php?page=3&id=951&db=1>
- [13] Galbán-Rodríguez, L., Algunas reflexiones sobre las causas que generan el riesgo geológico en la provincia Santiago de Cuba. III Taller Internacional "Nuestro Caribe en el Nuevo Milenio". Universidad de Oriente, Santiago de Cuba, Cuba, 2009. ISBN: 979-859-107-129-9.
- [14] Geocuba Oriente Sur. SIG de la base cartográfica de Santiago de Cuba a escala 1:100 000. Santiago de Cuba, Cuba. Cortesía de los autores. 2010.
- [15] Nagy, E. et al., Contribución a la geología de Cuba Oriental. Instituto de Geología y Paleontología, Acc. Editorial Científico Técnica. La Habana, Cuba. 1983.
- [16] NOAA/NWS. Modelo de la amplitud de las olas generadas por el terremoto de 1882 cerca de Panamá. Programa de alerta de tsunamis del Caribe del Servicio Meteorológico Nacional de EE.UU. y la Universidad de Puerto Rico en Mayagüez, Parte 3, [en línea]. 2013. Disponible en: http://www.meted.ucar.edu/tsunami/strike_carib_es/_iframe/s4_p6.htm
- [17] ONEI. Anuario estadístico de Cuba 2018. Oficina Nacional de Estadística e Información. [en línea]. 2018. Disponible en: <http://www.one.cu/aec2012/20080618index.htm>
- [18] Pérez-de los Reyes E., et al., Las inundaciones costeras en Cuba. Sistema nacional de alerta de eventos naturales extremos en la zona costera. Publicaciones Red UTEEDA-CYTED. Editora UNAH. La Habana, Cuba. [en línea]. 2006. Disponible en: <http://uteeda.isch.edu.cu/Publicaciones-UTEEDA-CYTED/cuba/M1.swf>
- [19] Pérez-Escobar, E.M. y Sánchez-Cruz, R., Interpretación de los campos magnéticos y gravimétricos profundos del sistema de fallas Santiago con fines sismotectónicos. 2da Convención Cubana de Ciencias de la Tierra, GEOCIENCIAS'2007. Memorias, La Habana, Cuba. [en línea]. 2007. ISBN: 978-959-7117-16.2. Disponible en: http://www.redciencia.cu/geobiblio/paper/2007_geologia.pdf
- [20] Regadera, L., et al., Diagnóstico de la calidad de las aguas en la Bahía de Santiago de Cuba. Memorias, Conferencia Internacional de Manejo Integrado de Zonas Costeras. "CARICOSTAS 2005". Santiago de Cuba, Cuba, [en línea]. 2005. ISBN 959-207-195-0. Disponible en: <https://www.oceandocs.org/bitstream/handle/1834/3572/061%20CO%20NTROL%20DE%20LA%20CALIDAD%20AMBIENTAL%20DEL%20ECOSISTEMA....pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [21] Rosabal-Domínguez, S., Zapata-Balanqué, J.A. y Gómez, J., Incidencia de la geomorfología en los impactos ambientales negativos en la carretera de Beltrán, Guantánamo, Cuba. Revista Mapping Interactivo, [en línea]. 18(133), pp. 94-98, 2009. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3223583>
- [22] Varner, J., Mapa de impactos de tsunamis en el Caribe 1493-2013. Centro Nacional de Datos Geofísicos, Nicaragua. [en línea]. 2013. Disponible en: <http://www.ngdc.noaa.gov/hazards/tsu.shtml>
- [23] Villalón-Semant, M., Rosabal-Domínguez, S., Infante-Gilart, Y., Chuy-Rodríguez T.J. y Zapata-Balanqué, A., Riesgo por deslizamientos de tierra en la provincia Santiago de Cuba. Centro Nacional de Investigaciones sismológicas. Archivos CENAIIS. Santiago de Cuba, Cuba, 2012.
- [24] Villarrubia.Román, R., Reciclaje de desechos sólidos en el Centro Histórico de la Ciudad de Santiago de Cuba. Un reto para el futuro. II Conferencia Internacional de Manejo Integrado de Zonas Costeras, CARICOSTAS 2005, Santiago de Cuba, Cuba. 2005. ISBN: 959-207-195-0.

L. Galbán-Rodríguez, es graduado como Ing. Geólogo en 1995, Dr. en Ciencias Geológicas en 2015, todos en la Universidad de Moa (anteriormente: Instituto Superior Minero Metalúrgico), Holguín, Cuba. Actualmente es profesor titular de la Universidad de Oriente en Santiago de Cuba, Cuba. Encargado de las disciplinas de Geotecnia e hidrogeología en la carrera de Ingeniería Hidráulica, Facultad de Construcciones. Premio Nacional de la Academia de Ciencias de Cuba, 2014. Sus intereses de investigación se relacionan con evaluación de riesgos y desastres, vulnerabilidad y riesgos de obras hidráulicas, estudios medioambientales, Estudios de peligros geológicos, entre otros relacionados.
ORCID: 0000-0002-2377-9008

R.M. Guardado-Lacaba, es graduado como Lic. en Geología en 1974 en la Universidad de Oriente, Santiago de Cuba, Dr. en Ciencias Geológicas en 1989, en la Universidad de Moa (anteriormente: Instituto Superior Minero Metalúrgico), Holguín, Cuba. Actualmente es profesor titular de la Universidad de Moa, Cuba. Encargado de las disciplinas de Geotecnia y Geodinámica en la carrera de Ingeniería en Geología, Facultad de Geología y Minas. Premio Nacional de la Academia de Ciencias de Cuba, 2002, 2013. También es académico titular de la Academia de Ciencias de Cuba. Sus intereses de investigación se relacionan con evaluación de riesgos y desastres, peligro, vulnerabilidad y riesgos geológicos, estudios medioambientales, entre otros relacionados.
ORCID: 0000-0003-1075-8176

T.J. Chuy-Rodríguez, es Graduado como Lic. en Física en 1978 en la Universidad de Oriente, Santiago de Cuba, Dr. en Ciencias Geofísicas en 1999, en la Universidad Tecnológica de la Habana (anteriormente: Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría- CUJAE), La Habana, Cuba. Actualmente es investigador titular del Centro Nacional de Investigaciones Sismológica de Cuba- CENAIIS y, profesor titular de la Universidad de Oriente en Santiago de Cuba, Cuba. También es académico titular de la Academia de Ciencias de Cuba. Premio Nacional de la Academia de Ciencias de Cuba, 2002, 2005, 2013, 2018. Sus intereses de investigación se relacionan con evaluación de riesgos y desastres, peligro, vulnerabilidad y riesgos sísmicos, estudios medioambientales, entre otros relacionados. ORCID: 0000-0003-1452-0683

Opportunities for the formulation of a sustainable business model for small-scale informal gold mining

Danilo Arturo Velilla-Avilez^a & Oscar Jaime Restrepo-Baena^b

^a Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, Facultad de Minas, Medellín, Colombia. davelillaa@unal.edu.co

^b Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, Facultad de Minas, Instituto de Minerales CIMEX, Medellín, Colombia. ojrestre@unal.edu.co

Received: November 27th, 2020. Received in revised form: January 23th, 2021. Accepted: February 15th, 2021.

Abstract

This paper is focused on working under the line of sustainability in small-scale informal gold mining projects, specifically in Colombia. It is interesting to study Artisanal and Small-Scale Mining (ASM) in Colombia from a business perspective as an activity that generates economic and sustainable development. ASM has great challenges to overcome in order to achieve sustainability in the industry, among them is to overcome informality in the sector, and thus be able to promote the development of a legally constituted economic activity. To achieve this objective, the National Government of Colombia has implemented a National Mining Formalization Policy, encouraging formality through mining formalization and regularization projects. In this work a review is carried out on the aspects that revolve around a Sustainable Business Model; use is made of the business modeling tool Canvas, whose input is secondary information sources, to present a Sustainable Business Model around small informal gold mining with a view to contributing to the purpose of achieving mining formality in operations in the territory.

Keywords: Artisanal and Small-scale Mining (ASM); gold mining; sustainability; sustainable business model; extractive processes; mining formalization.

Oportunidades para la formulación de un modelo de negocio sostenible en torno a la minería aurífera informal a pequeña escala

Resumen

Este artículo se enfoca en trabajar bajo la línea de la sostenibilidad en proyectos de minería informal de oro a pequeña escala, específicamente en Colombia. Resulta interesante estudiar en Colombia la Minería Artesanal y a Pequeña Escala (MAPE) desde una perspectiva empresarial como actividad generadora de desarrollo económico y sostenible. La MAPE tiene grandes desafíos a vencer para alcanzar el carácter de sostenibilidad en la industria, entre ellos está el superar la informalidad en el sector, y así poder impulsar el desarrollo de una actividad económica legalmente constituida. Para alcanzar este objetivo, el Gobierno Nacional de Colombia ha implementado una Política y un Plan de Formalización minera a nivel nacional, incentivando la formalidad a partir de proyectos de formalización y regularización minera. En este trabajo se realiza una revisión sobre los aspectos que giran en torno a un Modelo de Negocio Sostenible; se hace uso de la herramienta de modelado de negocios Canvas, cuyo insumo de trabajo son fuentes de información secundaria, para presentar un Modelo de Negocio Sostenible alrededor de la pequeña minería de oro informal con miras a contribuir en el propósito de lograr la formalidad minera en las operaciones del territorio.

Palabras clave: Minería Artesanal y de Pequeña Escala (MAPE); minería de oro; sostenibilidad; modelo de negocios sostenible; procesos extractivos; formalización minera.

1. Introducción

Muchas discusiones han girado en torno a los problemas sociales, ambientales, económicos y de seguridad y salud ocupacional que genera la minería artesanal y de pequeña escala (MAPE), problemas que imposibilitan el desarrollo

sostenible en y alrededor de la actividad, tales como: abandono de los derechos humanos, falta de seguridad, trabajo infantil, discriminación de género, contaminación de las masas de agua, polvo y ruido, degradación de la tierra, contaminación por mercurio y cianuro, falta de seguridad colateral, dificultad para capturar la renta, falta de educación

How to cite: Velilla-Avilez, D.A. and Restrepo-Baena, O.J. Oportunidades para la formulación de un modelo de negocio sostenible en torno a la minería aurífera informal a pequeña escala.. Boletín de Ciencias de la Tierra. Territorios del Futuro, 49, pp. 26-38, Agosto 2020 - Enero 2021

y profesionalismo, falta de adaptación al cambio tecnológico, efecto de precipitación mineral (tragedia de los comunes), retardo del crecimiento económico, problemas de seguridad y salud, entre muchos otros [1], convirtiéndose así en un tema importante en el desarrollo internacional. Entidades como el Banco Mundial, el PNUD y el Departamento para el Desarrollo Internacional del Reino Unido, han encabezado una iniciativa mundial para regularizar las actividades de la industria, educar a los mineros sobre cuestiones medioambientales clave, diversificar los medios de subsistencia en las regiones dependientes de la minería y desarrollar sistemas sostenibles [2].

Diversos trabajos han tratado de abordar el tema, con el fin de encontrar caminos que conduzcan a superar el carácter de insostenibilidad de la MAPE y así poder direccionarla como una actividad que contribuya al desarrollo sostenible. La eliminación del uso del mercurio en la minería artesanal y de pequeña escala de oro es uno de los temas que más ha concentrado la atención de los investigadores, [3] consideran que la forma como se beneficia el oro produce un dilema social, ya que el uso de técnicas tradicionales y de bajo costo para recuperar el metal, produce a su vez, beneficio a corto plazo y pasivos ambientales; proponiendo entonces, que es importante entender los dilemas sociales con que conviven las comunidades mineras para buscar el mejoramiento del bienestar de éstas, a través de estudios de emprendimientos asociativos y de la concientización por parte de los afectados para la comprensión del dilema. Otro tema relevante está asociado con el carácter de informalidad, tema a partir del cual han surgido trabajos que proponen incentivar soluciones desde un punto de vista de legalidad nacional. [4] manifiesta que la formalización y reconocimiento de la MAPE apoyada desde los gobiernos es crucial para los países, siendo éste el primer paso para lograr que la MAPE sea un medio de vida sostenible; de este modo, lo mineros se hacen más responsables en temas legales, sociales y ambientales, ya que la propiedad de las áreas mineras es transferida por el gobierno hacia ellos, razón de peso que los conduciría a proteger lo que les pertenece. [5] han concluido algo similar, manifestando que estudiosos y profesionales han llegado al consenso de que las actividades de intervención en las comunidades donde se desarrolla la MAPE no deben centrarse primordialmente en la reducción de la contaminación, la creación de capacidad o la transferencia de tecnología, sino en la formalización de los mineros a través del reconocimiento de derechos. De otro lado, y no apartándose del reconocimiento de derechos de propiedad, Verbrugge & Besmanosm [6] adicionalmente proponen que los esfuerzos de formalización del sector ASM no sean meramente sensibles a los regímenes de tenencia preexistentes (minerales), sino que también tengan en cuenta los arreglos organizativos que existen dentro de la fuerza de trabajo y entre la fuerza de trabajo y otros normalmente más poderosos, las partes interesadas en el sector ASM.

Desde la perspectiva empresarial en la búsqueda de la sostenibilidad, [7,8] coinciden en que para construir y establecer políticas exitosas para el desarrollo sostenible; los investigadores, los responsables de la formulación de políticas y los profesionales deberían tener en cuenta los diversos vínculos entre los actores económicos asociados a la

producción y el consumo de determinados productos, así como a los responsables de los canales a través de los cuales se pueden desarrollar y difundir los esfuerzos de sostenibilidad. Ejemplos de avances de ejecución de algunas políticas específicas en países como Zimbabwe y Ghana, han surgido gracias al importante papel que juega la MAPE como renglón económico en estos.

En el panorama Nacional, Colombia ha adoptado la Política Nacional para la Formalización de la Minería, dirigida a comunidades mineras tradicionales que ejercen su actividad sin título minero, así como también a aquellos que, contando con un derecho minero, la desarrollan en completa informalidad legal, técnica, ambiental, económica, laboral y social; con lo que se apunta, entre otras cosas, “Estimular el desarrollo asociativo de la minería de pequeña escala con estándares de formalidad económica, empresarial y ambiental...” [10]. Otras políticas que han buscado fomentar el empresarismo en la minería informal de oro, especialmente incentivando la asociatividad, fueron la Política de Mejoramiento de la Productividad y la Competitividad del Sector Minero – 2007 [9] y el Programa Desarrollo y Evaluación de Distritos Mineros [10].

Ahora bien, desde la asociatividad se destaca el modelo de negocio cooperativo, sin embargo, la experiencia en países como Brasil [11] y la República Democrática del Congo, sugiere que este no ha tenido los resultados esperados al abordar las preocupaciones que se buscan resolver a través de la sostenibilidad en la minería a pequeña escala.

Puesto que el gobierno de Colombia a través de su política de formalización minera busca fomentar el emprendimiento empresarial y dado que no existe mucha investigación y por tanto vacíos en la literatura en temas relacionados con el desarrollo de empresas y negocios en la pequeña minería informal y artesanal [11], en aras de alcanzar la sostenibilidad en proyectos mineros de pequeña escala resulta interesante estudiar la MAPE en Colombia desde una perspectiva empresarial como actividad generadora de desarrollo económico y sostenible.

2. Modelo de negocio sostenible

El concepto de modelo de negocio se hizo prevaleciente con el advenimiento del Internet a mediados de la década de 1990 y ha cobrado impulso desde entonces, utilizándose el mismo término para explicar y abordar diferentes fenómenos en distintos contextos y áreas de gestión, por lo que se podría decir que el término en su uso actual no es un concepto, sino, muchos conceptos [12], así, los académicos no han llegado a un acuerdo general sobre qué es un modelo de negocios [12,13].

Las definiciones actuales de un modelo de negocio solo hacen referencia (e implícitamente) a lo económico (mercado) como un límite del sistema de interés; así, cuando el intercambio de valor se mide solo en unidades monetarias, la extensión del modelo de negocios a otras definiciones de valor es estrictamente limitada [14]. Sin embargo, en los últimos años ha surgido el término *modelo de negocio sostenible*, el cual se refiere a aquellos modelos de negocio que buscan ir más allá de la entrega de valor económico e incluyen la consideración de otras formas de valor para una

gama más amplia de partes interesadas [15]. [16] después de estudiar distintas definiciones de diversos autores, definen un Modelo de Negocio Sostenible como *modelos de negocios que incorporan una gestión proactiva de múltiples partes interesadas, la creación de valor monetario y no monetario para una amplia gama de partes interesadas, y mantienen una perspectiva a largo plazo*. De esta manera, un modelo de negocio sostenible debe contener visiones multidireccionales que conduzcan a un fin común; más que solo crear, entregar y capturar valor económico que beneficie solo a los accionistas de la empresa, debe buscar entregar a través de sus productos o servicios una propuesta de valor que sea capaz de internalizar en sí misma beneficios que sean trasladados tanto a sus clientes, como a la empresa, al ambiente y a la sociedad; es entender cómo hacer atractivo para el mundo los productos o servicios que se construyen bajo la ética y que son justos con la naturaleza y con la sociedad, que en ultimas son las que, respectivamente, ofrecen la materia prima y la fuerza para transformarla, procurando obtener beneficios haciendo el negocio atractivo buscando la continuidad del mismo a largo plazo. La existencia de los métodos cuantitativos no monetarios cuyo objetivo es establecer y medir indicadores biofísicos (y / o no monetarios), pueden proporcionar información suficiente sobre las funciones y beneficios del ecosistema a las personas sin la necesidad de ponerles un valor monetario; [17], por ejemplo, la cantidad de contaminación eliminada al dejar de utilizar el mercurio, (kilogramos que no llegarían a la naturaleza), que pueden verse como valor de tipo ambiental que es trasladado al producto producido y puede ser absorbido por el cliente. Ampliar el concepto de valor a las unidades no monetarias puede permitir el uso de una variedad de otros indicadores que pueden ayudar en la toma de decisiones ambientales [17]. Partiendo de la idea de que el Valor para el Cliente o consumidor se considera en la literatura de marketing como la base para toda actividad de marketing efectiva [18], adoptaron definiciones de distintos tipos de valor que contribuyen a la adopción de marcas ecológicas, teniéndose entonces el valor económico, social, hedónico y altruista, los cuales se pueden estudiar con más detalle en el trabajo de [19].

3. Metodología

Inicialmente se desarrolló una investigación en torno a los conceptos de Modelo de Negocio y Modelos de Negocio Sostenible, posteriormente se seleccionó el concepto de Modelo de Negocio desarrollado por [20], a partir del cual crearon la ontología del Modelo de Negocios, también llamada Metodología Canvas la cual se muestra en la Fig. 1, a partir de este esquema se realizó un diagnostico preliminar de la minería de oro informal de cuatro de los departamentos que concentran al menos el 74% de la producción de oro en Colombia en los últimos 10 años [21]. Posteriormente se continuó con la investigación recurriendo principalmente a fuentes secundarias, tales como artículos, libros y noticias. Producto de esta primera revisión se determinó el departamento con mayor participación en la producción aurífera nacional, así como los municipios

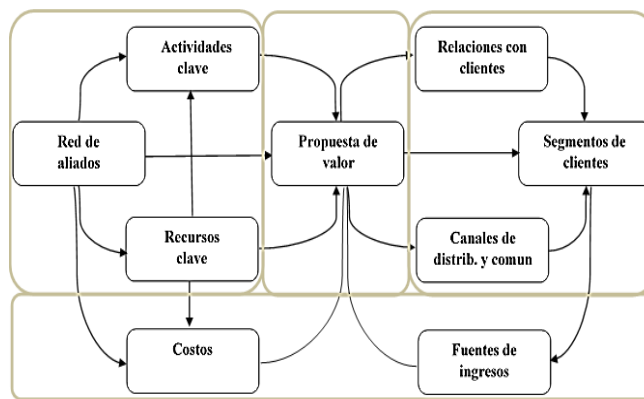


Figura 1. Diagrama de la ontología de modelos de negocio propuesta por Osterwalder.

Fuente [22].

pertenecientes a este que destacan en la explotación del metal; posteriormente se pudo tener acceso a información primaria de dos minas informales de oro ubicadas en los municipios identificados, con la cual fue posible identificar los principales componentes de sus modelos de negocio y las relaciones entre ellos, para finalmente enlazar toda la información obtenida durante el desarrollo del trabajo procedente tanto de fuentes secundarias y primarias y plantear un Modelo de Negocios que permita a estas minas salir de la informalidad y configurarse como industrias formales sostenibles y responsables.

4. Entorno del negocio de la minería del Oro

En la construcción de un modelo de negocio el entorno debe influir en las elecciones de diseño, ayudando a tomar decisiones más informadas. Por lo tanto, una buena comprensión del entorno permitirá evaluar mejor las diferentes direcciones en las que podría evolucionar el modelo de negocio. La Fig. 2 representa las cuatro áreas principales del entorno que en la metodología Canvas se sugiere estudiar para entender mejor el “espacio de diseño” [20]. En el presente trabajo se abarcó toda la información posible y de carácter relevante a la que se tuvo acceso.

4.1 Mercado del oro a nivel mundial

El mercado del oro es grande y complejo, vendiéndose el metal a un conjunto diverso de usuarios finales, tales como joyería, inversionistas, bancos centrales y tecnología. Gracias a lo valioso de este metal y a propiedades como la no corrosión, el oro tiene un mercado de reciclaje vibrante [23]. El oro posee valor emocional, cultural y financiero, por lo que en todo el mundo las personas lo compran por diferentes motivos, influenciados por factores socioculturales, nacionales, de condiciones del mercado local y factores macroeconómicos más amplios [24].

4.2 Mercado del oro en Colombia

Para el 2018, Colombia ocupa la posición 24 en el Ranking de Producción Mundial de oro con 35,6 toneladas, en Latinoamérica, Colombia se encuentra en la posición número 6, superado por Perú, México, Brasil, Argentina y Chile [25].

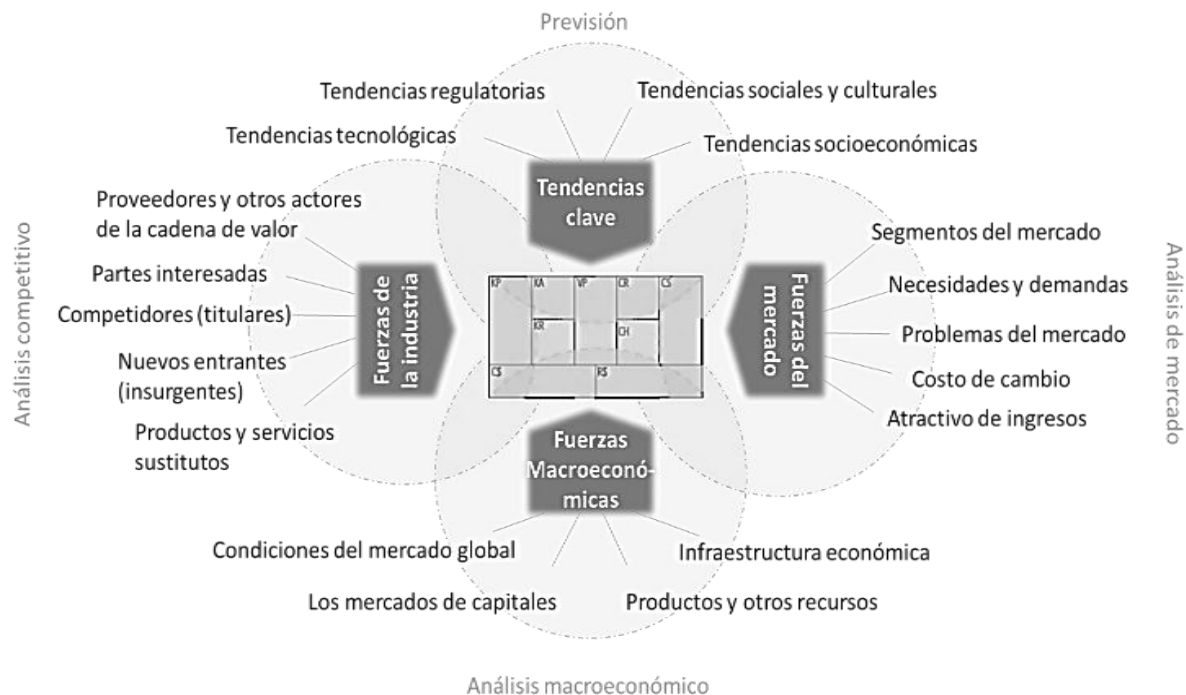


Figura 2. Entorno del modelo de negocios.
Fuente: Traducido de [20].

La participación en la demanda nacional proviene principalmente de las comercializadoras, que exportan el oro para usos industriales y, en particular para la joyería que es la de mayor importancia [26], luego se ubica el Banco de la República, seguido por las joyerías y las importaciones, participando cada uno en promedio en el periodo comprendido entre 2008 – 2012 con porcentajes de 97,7%, 1,8%, 0,2% y 0,2% respectivamente.

La oferta de oro en Colombia proviene principalmente de la producción minera y del reciclaje. El reciclaje de oro está liderado principalmente por las compraventas, que venden el oro proveniente de las joyas empeñadas que nunca son reclamadas, y otros elementos de oro en forma de joyas en mal estado.

La exportación de oro chatarra en Colombia disminuyó drásticamente desde 2009, pasando de 6,3 toneladas de oro de reciclaje en 2008 a cantidades aproximadamente inferiores o iguales a una tonelada en los siguientes años. Lo anterior sucedió cuando entró en funcionamiento la ventanilla única de comercio exterior -VUCE-, puesto a que antes de su implementación muchos intermediarios para evadir el pago de regalías y en algunos casos el control aduanero, declaraban oro de producción de mina como oro reciclado a través de la fabricación de joyas de mala calidad.

Es importante tener en cuenta que entre 2015 y 2016 más del 50% de la producción fue reportada por mineros de subsistencia, bajando el rango a 35% para el 2017. Así, el aporte de la gran minería de oro proviene de dos empresas, Mineros S.A., empresa nacional que produce aproximadamente el 6% del oro del país y gran Colombia Gold filial de Zandor en Colombia, empresa canadiense que produce alrededor del 7% del oro del país.

La producción histórica en Colombia de manera general ha tendido al alza. El crecimiento del sector minero en Colombia está ligado al aumento internacional del precio de los commodities, así como a un mejor entorno para la ampliación de la producción minera local [27], situación que produjo un aumento en las ganancias debido al mayor precio, especialmente del oro, lo que volvió atractivo explotar depósitos con menores tenores.

4.3 Panorama económico del Oro en Antioquia

Antioquia ha sido el departamento líder en la Producción Nacional de Oro durante los últimos 9 años, representando más del 50% del total nacional en los últimos tres, lo que indica que este departamento es el que mayor aporte tiene en el rubro económico del renglón de la minería de oro a nivel nacional.

Si bien en Antioquia en lo referente al Comercio exterior, el oro ha sido el mayor contribuyente al valor de las exportaciones trimestrales de los últimos tres años [28], este mineral ha tomado mucha importancia y relevancia en los ingresos generados por las exportaciones en el departamento en los dos primeros trimestres de 2020, en medio de la incertidumbre generada por la pandemia, para el trimestre II las ventas del oro crecieron más del doble comparadas con el mismo trimestre del año anterior y representaron el 46,6% del valor de las exportaciones departamentales [29], de manera similar ocurrió para el primer trimestre en donde las exportaciones de oro ocuparon el 29,4% del total departamental, liderando los ingresos por ventas al exterior [30]. Lo anterior, aparte de reflejar lo importante que es para Antioquia el negocio del oro, refleja lo relevante que puede llegar a ser para la reactivación económica en momentos de crisis.

En el departamento la explotación de oro abarca el 99,5% del total de las Unidades de Producción Minera (UPM) que explotan minerales metálicos, a la vez, estas representan el 75,8% de las explotaciones mineras de este [31]. En el país la mayor parte de la producción de oro proviene de mineros de pequeña y mediana escala que operan de manera informal; contándose con que de las 4.133 UPM de oro del territorio nacional un 87% no cuenta con títulos mineros legales. Antioquia concentra 1.526 UPMs de oro del total nacional [32], y se estima que el 80% del oro que se produce en su territorio proviene de empresas que no son legales, donde la explotación ilegal está directamente relacionada con el carácter informal que posee la industria del oro en el país [33]. En el departamento, según Fedesarrollo (2014) el 90,2% de las minas de oro son informales, de las cuales un 31,1% son minas de veta (filón) y un 68,7% de aluvión.

Para la minería de oro a pequeña escala se valoran cifras que van desde 15.000 familias hasta un millón de personas que dependen de esta [33]. De acuerdo al estudio llevado a cabo por Fedesarrollo (2014) en Antioquia, Caldas, Bolívar y Chocó, se calculó que de 23.668 trabajadores que dependen de la minería de oro, el 47% es absorbido por Antioquia.

4.4 Formalización en Antioquia

La formalización, específicamente la línea de regularización minera, la cual está dirigida a mineros tradicionales que no poseen legalidad minera, cuenta con varios mecanismos que permiten a la UPM tradicional constituirse legalmente, estos son: subcontratos de formalización minera, áreas de reserva especial, contratos de operación y devolución (cesión) de áreas.

4.5 Márgenes operativos de la pequeña minería informal de oro en Antioquia

El trabajo de Fedesarrollo (2014) [21] de la minería informal en Colombia estimó los costos e ingresos por gramo de oro producido en la actividad en los cuatro departamentos que fueron objeto de estudio - Antioquia, Choco, Caldas y Bolívar - para esto, realizaron una clasificación de la minería de acuerdo al número de trabajadores en cada unidad, dividiéndolas en micro, pequeñas, medianas y grandes UP, tal como se aprecia en la Tabla 1, -de las cuales las micro UP representaron el 80% de la muestra de la investigación-, cuyo objetivo fue realizar una medición de márgenes operativos por cada tipo de UP para estudiar las posibilidades reales de llevar a cabo procesos de formalización de manera exitosa.

En la Tabla 2, se presentan y analizan los datos arrojados por el estudio de Fedesarrollo: [21], para las micro, pequeñas y medianas y grandes UPMOI pertenecientes al departamento de Antioquia, en lo que concierne a margen operativo y estructura de costos.

Tabla 1.

Clasificación por tamaño de minería informal de Oro.

Micro UPMOI	<10 Trabajadores
Pequeñas UPMOI	11-50 trabajadores
Medianas y Grandes UPMOI	>51 trabajadores

Fuente: [21].

Tabla 2.

Estructura de costos y margen operativo UPMOI en el Departamento de Antioquia.

	Micro UPMOI	Pequeñas UPMOI	Medianas y Grandes UPMOI
Margen operativo en Antioquia	0.78	0.03	-0.12
% Estructura de costos			
Combustibles	24%	32%	19%
Químicos	13%	2%	6%
Herramientas	4%	2%	4%
Maquinaria	34%	49%	12%
Salarios	34%	15%	60%

Fuente: [21].

Adicionalmente, se tiene con que las explotaciones de veta y aluvión en la micro UPMOI que podrían asumir algún tipo de contribución fiscal y social luego de ser tituladas, serían las pertenecientes a los cuartiles superiores de producción, cuyos márgenes operativos medios van desde el 40% hasta un 438%; mientras que las explotaciones de veta y aluvión en la pequeña UPMOI que podrían asumir algún tipo de contribución fiscal y social luego de ser tituladas, serían las pertenecientes al cuartil superior de producción, cuyos márgenes operativos medios son del 26% y 27% respectivamente. Finalmente, las medianas y grandes UPMOI tendrían solo un margen operativo positivo en las empresas dedicadas a la minería de aluvión con mayores producciones, particularmente en el departamento del choco, con margen del 0,07%.

4.6 Particularidades en torno a la actividad

Revisando las condiciones del entorno, y desde la perspectiva de las fuerzas macroeconómicas, Colombia ha dado importantes pasos en materia de convenios y tratados internacionales, se podría decir, que con su reciente ingreso a la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE) y el Comité Internacional para el Reporte de Recursos y Reservas (CRIRSCO por sus siglas en inglés). La OCDE sería para el país un “Sello de calidad” tal como lo señaló el ex -ministro de hacienda Mauricio Cárdenas, quien recalco que “abre puertas porque nos va a permitir insertarnos mejor en el mundo y tener más oportunidades de inversión en Colombia” [34], con el ingreso a la OCDE el gobierno debe asumir el compromiso de llevar a cabo las mejores prácticas en temas de índole social, económico y ambiental, cuyo objetivo será alcanzar niveles sostenibles de crecimiento económico y empleo, así como aumentos significativos en el nivel de vida de sus habitantes, avanzando en temas de salud, educación, lucha contra la corrupción y la protección del medio ambiente [27].

Por otra parte, para pertenecer a CRIRSCO fue necesario crear el Estándar Colombiano para el Reporte Público de Resultados de Exploración, Recursos y Reservas Minerales – ECRR- 2018 [35], el “primer estándar colombiano para estimar, certificar y reportar los prospectos de exploración, de recursos y reservas minerales en Colombia” [36]. Entre las ventajas que trae contar con el estándar se encuentran, “especialmente la valoración de propiedades mineras; competitividad de los concesionarios dentro de la industria minera global;

Tabla 3.

Caracterización de la UPMOI bajo la metodología Canvas de modelo negocio.

ALIADOS CLAVE	ACTIVIDADES CLAVE	PROPUESTA DE VALOR	RELACIONES CON LOS CLIENTES	SEGUIMIENTO DE CLIENTES		
Comerciantes locales (66%-72% UPMOI combustibles, químicos y herramientas; 43% UPMOI maquinaria) comerciantes regionales (21% -29% UPMOI, combustibles, químicos y herramientas; 34% UPMOI maquinaria); Empresas Nacionales (14% UPMOI, maquinaria) socio Asociación/cooperativa	Extracción Beneficio	Oro fundido	Personalización Contribuir a la confianza del cliente	Comercializador	Veta/filón 45%	Aluvión 28%
	RECURSOS CLAVE		CANALES	Compra Venta	35%	59%
	Insumos	Oro libre	Operador Minero (fuerza de ventas) Bocamina Municipio Otro Municipio	Fundidora	7%	7%
	Combustibles			Empresa M. G.E	1%	0%
	Químicos			Consumidor Final	0%	0%
Herramienta	Colas del proceso	Asociación/ Cooperativa	Proveedor como parte de pago	0%	3%	
Maquinaria			Otro	12%	2%	
Conductor				Otro	1%	0%
Minero						
ESTRUCTURA DE COSTOS			FLUJO DE INGRESOS			
General	Veta / Filón	Aluvión	Venta del Producto			
Combustibles	36%	18%	Método de precio - Precio fijo – Precios del mercado			
Químicos	3%	17%	Contratos escritos con sus compradores (menos del 4%)			
Herramienta	2%	8%	Efectivo 99% - sistema financiero 1% - En insumos o servicios 0%			
Maquinaria	42%	21%				
Salarios	18%	36%				

Fuente: Los autores, basada en [21].

apalancamiento financiero y acceso al capital de riesgo; creaci6n de valor en la industria minera con responsabilidad social y ambiental; planificaci6n de proyectos mineros sostenibles; y reconocimiento para nuestros profesionales a trav6s de los acuerdos de reciprocidad con los pa6ses miembros en CRIRSCO” [37].

En cuanto a tendencias clave, se destacan algunas de car6cter regulatorio, social y tecnol6gicas. El uso del mercurio pas6 a ser ilegal en la minería desde el 16 de julio de 2018 con la entrada en vigencia de la Ley 1658 de 2013, raz6n por la que se han adelantado proyectos para brindar a los mineros alternativas de extracci6n de oro distintas al uso del metal l6quido, dado que este es el principal insumo utilizado para recuperarlo.

Otro insumo importante del que depende la minería a pequeña escala de oro son los explosivos, de acuerdo a [38], especialmente en Antioquia el tráfico de éstos se ha convertido en un negocio lucrativo, incrementándose substancialmente desde el 2016 en el Nordeste y occidente del departamento, donde los precios de compra de una unidad mínima de venta llamada “mano”, exceden en 5.6 veces más el valor del precio legal.

Sumado a lo anterior, se encuentra la extorsi6n, otro fenómeno que golpea fuertemente a los mineros. Documentos incautados por la Policía Nacional a las FARC (en ese momento como grupo armado ilegal) y al ELN contenían informaci6n sobre ganancias provenientes de la minería ilegal, del total de los documentos de las FARC un 80% tenía datos relacionados con la actividad extractiva, mientras que para el ELN el porcentaje ascendía a un 65% de estos [33]. Sin embargo, no siempre los grupos armados ilegales se involucran directamente en la cadena de suministro, sino que recurren a la extorsi6n, o lo que sería como un “impuesto (conocido localmente como vacuna) por cada minero o buldócer que opere en un sitio, o por cada gramo de oro producido a cambio de protecci6n” [33].

Además, estos grupos en ocasiones obligan a mineros artesanales a trabajar para ellos y cuando no lo hacen cobran un porcentaje de las ganancias de las ventas del oro que oscila entre un 5% y un 10%.

5. Interpretaci6n de la minería de oro informal en Colombia bajo el Modelo Canvas

Primeramente, basado en los datos de [21], se realiz6 una interpretaci6n del negocio de la minería informal de oro en Colombia bajo la metodología Canvas, en donde se caracterizaron los nueve bloques de construcci6n contemplados en el Lienzo para creaci6n de modelos de negocio, en cada uno se plasma la identificaci6n del componente de la minería informal en cada segmento. El resultado de manera simplificada puede observarse en la Tabla 3.

6. Caso de estudio

Hist6ricamente los municipios de El Bagre, Segovia y Remedios han sido los principales productores de oro en Colombia [39], todos ubicados en Antioquia, representado más del 50% de la producci6n departamental en los últimos 6 años. Para el 2018, 2019 y 2020, la participaci6n de cada uno de estos municipios en el total departamental ha variado entre el 21% y 24% para Remedios, entre el 20% y 24% para Segovia y entre el 14% y 23% para el Bagre, en su orden, a nivel nacional en el 2019 representaron el 12,9%, 15,2% y 8,9% de la producci6n aurífera. Tanto así, que los municipios de Segovia y Remedio conforman el llamado Distrito Minero Segovia-Remedios, el cual es considerado como la principal área de filones del departamento [40].

Tabla 4.
Descripción Mediana UPMOI Y.

Mina (Y)	
Ubicación	Segovia
Tipo de minería	Subterránea
Número de empleados	>120 <130
Nivel de escolaridad	Primaria
Afiliación Seguridad social (ARL, salud, pensión)	No
Tenor Promedio (g/t)	11,5 - 45
Estudios geológicos	Sin estudios
Reservas estimadas	Sin reservas
Frentes de explotación	3
Sistema de Benéfico	Hg y Cianuro

Fuente: Los autores, basada en información obtenida de las UP estudiadas.

Tabla 5.
Descripción Micro UPMOI Z.

Mina (Z)	
Ubicación	Remedios
Tipo de minería	Subterránea
Número de empleados	>5 <10
Nivel de escolaridad	Primaria
Afiliación Seguridad social (ARL, salud, pensión)	No
Tenor Promedio (g/t)	12
Estudios geológicos	Sin estudios
Reservas estimadas	Sin reservas
Frentes de explotación	1
Sistema de Benéfico	Hg

Fuente: Los autores, basada en información obtenida de las UP estudiadas.

En Antioquia el municipio de Segovia es particularmente importante, puesto que es uno de los municipios de la subregión que más aporta al PIB departamental, aporte proveniente de la explotación mineral, ya que éste es

poseedor de grandes reservas mineras, siendo “la principal fuente de ingresos, si no la única, la minería y todas las actividades que a partir de ella se generan” [40].

Como dato adicional, el municipio de Segovia para el año 2010, era considerado el lugar del mundo más contaminado por Hg, este junto a otros cinco municipios del Nordeste y Bajo Cauca Antioqueño registraban concentraciones del metal en el aire entre 10 y 20 veces más que la máxima permitida [41]. De tal manera, y basándose en lo antes mencionado, se decidió seleccionar para el estudio dos minas ubicadas geográficamente en estos municipios.

Para entender la actividad desde su interior, se tuvo acceso a la información de dos Unidades de Producción Minera Informal de Oro ubicadas en la zona del Distrito Minero de Segovia-Remedios, fue elegido este distrito y especialmente estos municipios atendiendo a su relevancia en la participación de la producción de oro a nivel nacional. Las características de las UPMOI se describen en las Tablas 4 y 5, una pertenece al rango de las Micro UPMOI (Z) y la otra al rango de Mediana UPMOI (Y), según la clasificación realizada por [41], sin embargo, se precisa a que ambas operaciones pertenecen al rango de la Pequeña Minería según lo establecido en el Decreto 1666 de 2016 del Ministerio de Minas y Energía-.

6.1 Descripción particular de la UPMOI bajo la herramienta Modelo de Negocio de Canvas

Partiendo del modelo Canvas se realizó una aproximación de la manera en que se concibe el negocio en las operaciones, primero se describen los componentes del modelo, finalizando luego con la representación simplificada de éste, la cual se plasma en la Fig. 3.

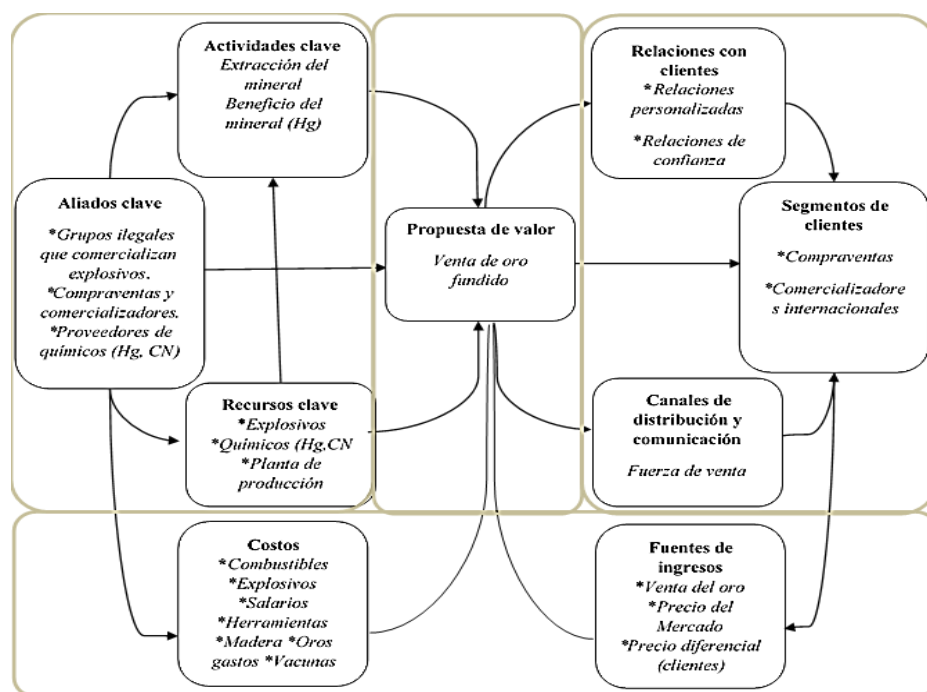


Figura 3. Representación simplificada de la Configuración del Modelo de Negocio actual de la UPMOI.

Fuente: Elaboración propia.

6.1.1 Clientes

Casi que exclusivamente el cliente de las unidades productivas (UP) son las compraventas locales, ubicadas en la cabecera municipal, los mineros venden el oro localmente para evitar los gastos que trae el desplazamiento a las ciudades principales y también para evitar la exigencia de documentación de origen y de situación legal; también, pero en menor proporción, algunos venden el oro en Medellín en lo que ellos llaman comercializadora, sin embargo, realmente corresponden a intermediarios como compraventas y/o joyerías.

El operador minero conserva la esperanza de poder vender el oro a clientes que ofrezcan mejores garantías de pago, donde los precios estén más acordes o cercanos con el precio internacional del oro.

6.1.2 Propuesta de valor

Se identifica que la propuesta de valor de la UP esta reducida casi que exclusivamente a la venta del oro fundido o quemado, que es el resultado de exponer la amalgama a una llama para que el mercurio se evapore y así obtener el oro.

6.1.3 Relaciones con los clientes

El tipo de relación que sostienen los mineros con sus clientes está caracterizado por funciones del tipo *personalización de las relaciones y generación de confianza*. Lo que buscan los mineros es establecer contactos que perduren, puesto que generar estabilidad en las relaciones trae consigo seguridad en las ventas, precios y transacciones.

6.1.4 Canales de distribución y comunicación

El metal se distribuye bajo la figura de *fuerza de ventas*, ya que se utilizan para la comercialización del producto recursos humanos y materiales propios de la unidad de producción minera. El operador minero informal vende su oro directamente, sin recurrir a intermediarios, ya sea en la compraventas locales o en la ciudad de Medellín, manteniendo un tipo de relación personalizada con los clientes, basada en la confianza generada con estos; la confianza es fundamental debido a que al no ser explotadores legales deben trabajar en fortalecer la relaciones con las personas que adquieren el oro, puesto que si se cierran los mercados donde se comercializa el metal, los mineros serán más vulnerables a ser acusados (o señalados) como comerciantes no autorizados o ilegales.

6.1.5 Medio ambiente

Actualmente las UP no cuentan con un rubro de dinero especialmente destinado para cubrir gastos ambientales, es decir, no hay inversión en planes u obras que busquen resarcir los daños ambientales, o mitigar el daño que por contaminación o uso de los recursos naturales se hace al ambiente. Se identifica que lo anterior se debe a que el pequeño minero no cuenta con el dinero, el personal y el tiempo suficiente para invertir en investigación y tecnología

que busque estudiar, prevenir y mitigar los impactos al medio natural.

6.1.6 Aliados clave

La continuidad de la operación depende de manera crítica de dos insumos, los explosivos y el mercurio, lo anterior dado a las limitaciones legales para adquirirlos, condición que determina los aliados claves de la UP. Por lo tanto, el minero informal en su actividad depende de las relaciones establecidas con los proveedores ilegales de explosivos, dado al carácter informal de la explotación la UP no cuenta con el certificado de uso de explosivos aprobado por parte del Departamento Comercio Control de Armas (DCCA), por lo que no es posible conseguirlo de manera legal, así mismo ocurre con el proveedor del Mercurio, toda vez que el uso de este está prohibido en la actividad minera. Por otra parte, también se establecen relaciones importantes y primordiales con los compradores del oro producido, estas se fundamentan en factores como: garantías en el precio de venta y la generación de confianza con el comprador.

6.1.7 Flujo de ingresos

El flujo de ingresos en la UP básicamente resulta de la venta del oro, donde el minero no tiene (o es muy reducido) poder de negociación sobre el precio, variando este de acuerdo con el valor de referencia del precio internacional del metal. El precio que consigue el minero informal es generalmente menor al de referencia, siendo esto consecuencia del carácter informal de la actividad, así, aunque el mecanismo del precio de oro es de precio del mercado, para el minero informal cabría mencionar que existe un pequeño rango donde tiene lugar una especie de fijación diferencial del precio, pero la cual es establecida por parte de los clientes, esta fijación diferencial ocurre por el carácter informal del oro, puesto que los compradores (quienes son intermediarios antes de que el oro llegue a su mercado final) deben buscar la manera de legalizarlo para poder comercializarlo, así, estos se valen de esta condición para jugar con el precio, argumentando que existen costos adicionales que ellos deben asumir hasta poder legalizar el metal.

Se expresa por algunos mineros, que la comercialización del oro se ve entorpecida por distintas razones. La inseguridad, la falta de soporte de ventas, la inestabilidad de precios y la escasez de compradores que paguen a precios justos, son impedimentos que no permiten acceder a mejores precios de venta del mineral.

6.1.8 Recursos y actividades clave

De manera general el sistema de beneficio en su conjunto se configura como el recurso y la actividad clave más importante, ya que del buen funcionamiento de este depende la recuperación y extracción del mineral. Sin embargo, se identificó especialmente que los recursos clave de la operación están ligados a los insumos químicos, por ejemplo, los explosivos, debido a que estos se comercializan en el mercado ilegal, muchas veces se hace dificultoso conseguirlos, así como costoso. Por otro lado, el mercurio al ser de uso ilegal en la minería desde julio de 2018 según lo establecido en la Ley 1658

de 2013 [42] deja en mayor situación de vulnerabilidad a los pequeños mineros informales de oro, pues ahora les ilegalizaron el principal insumo de su método de trabajo.

6.1.9 Estructura de costos

La estructura de costos en las UPMOI se configura como se observa a continuación en las Tablas 6 y 7:

Tabla 6.

Estructura de Costos micro UPMOI Z.

Combustible	7,9%
Explosivos	25,2%
Madera	3,4%
Salarios	22,7%
Insumos químicos planta	24,3%
Herramientas	2,5%
Otros gastos	6,7%
EPP (Elementos de protección personal)	0,7%
Gastos de Extorsión	6,7%

Fuente: Los autores, basada en información obtenida de las UP estudiadas.

Tabla 7.

Estructura de Costos mediana UPMOI Y.

Explosivos	11,3%
Energía eléctrica	4,2%
Otros gastos	4,7%
Salarios	56,0%
Combustibles	8,3%
Insumos químicos planta	10,1%
Madera	1,2%
Herramientas	1,2%
EPP (Elementos de protección personal)	1,2%
Gastos de Extorsión	1,9%

Fuente: Los autores, basada en información obtenida de las UP estudiadas.

De la estructura de costos de ambas unidades de producción minera, se observa que en estas aparecen los explosivos como un costo importante en ambas explotaciones; el explosivo, a pesar de ser mencionado en el estudio de [21], no se le asigna específicamente un porcentaje de participación en los costos, ya que el costo relacionado a este está incluido en la categoría denominada químicos y minerales, la cual está conformada por seis insumos, a los que no se les especifica el peso porcentual en el costo total de la categorización; de los insumos, solo se hace alusión al porcentaje de las UPMOI que los utilizan. Se considera en la estructura de costos los dineros que se destinan al pago de vacunas y/o extorsión, ya que para los mineros esto se hace tan imprescindible como comprar mercurio o cianuro, toda vez que si no se cancela el valor acordado se corre el riesgo de que la operación sea detenida o entorpecida por parte de los grupos o bandas criminales que controlan las zonas mineras.

6.2 Propuesta conceptual para la formulación de un Modelo de Negocio Sostenible para la UPMOI en el marco de los procesos de formalización

A continuación, se desarrolla una propuesta conceptual de un Modelo de Negocio Sostenible, que busca impulsar la minería de oro a pequeña escala a fin de que este alcance el carácter formal en el sector. Cada una de las propuestas se explican abajo, y se entienden como estrategias que buscan garantizar en el largo plazo la estabilidad del negocio minero, estas se muestran de manera simplificada en la Fig. 4.

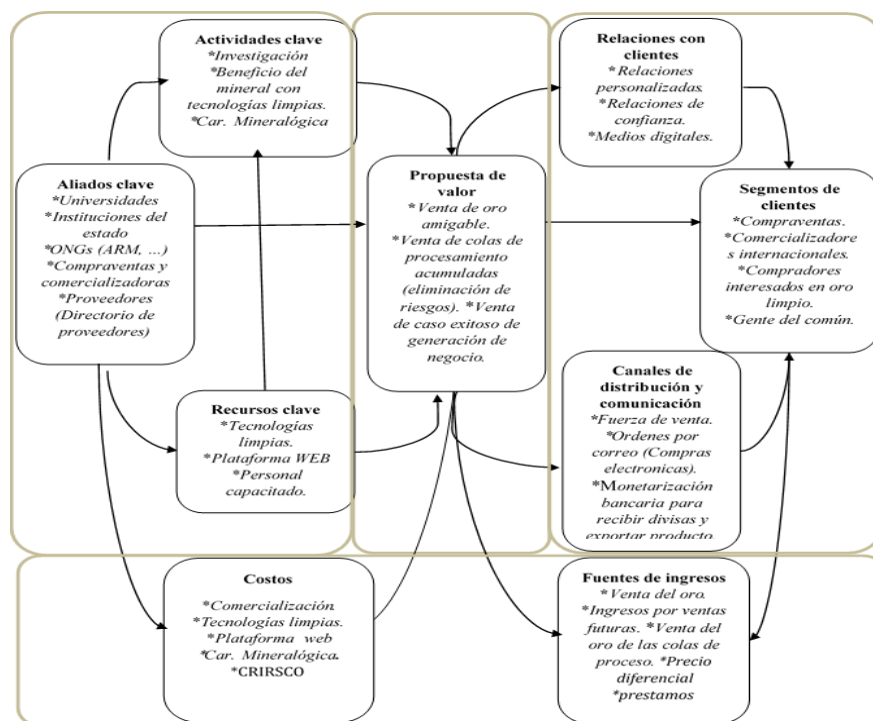


Figura 4. Representación simplificada de la propuesta Conceptual del Modelo de Negocio Sostenible para la UP.

Fuente: El autor.

6.2.1 Clientes

Compraventas, Comercializadores internacionales, Compradores interesados en oro limpio, Gente del común. Lo que se busca es que la Unidad de Producción Minera dirija su producto a mayores segmentos de clientes, con esto podría acceder de manera directa a mercados que están dispuestos a pagar un poco más atendiendo a ciertas características, por ejemplo, si se obtiene la certificación de oro amigable o responsable a través de un sello de calidad, esto sería atractivo para las personas u organizaciones que buscan obtener un *valor altruista o un valor social* [19] en la adquisición de este.

6.2.2 Propuesta de valor

La propuesta de valor en la producción de oro, estará dirigida a suministrar un oro cuyo proceso extractivo garantice prácticas ambientalmente responsables y justas con la sociedad, donde se busque reducir al mínimo el uso de químicos que traigan consecuencias negativas a la vida, a la vez que se implementen prácticas laborales seguras, *-aprovechando que el país hace parte de la OCDE se debe sacar beneficio implementando políticas exitosas que sean avaladas por el organismo y de esa manera a través de la OCDE poder acceder a mercados más exigentes-*, donde se garantice la seguridad de las personas que participen directamente en la actividad extractiva, así como también de las partes interesadas que se mueven alrededor de esta. De este modo, este oro buscará escalar a nuevos clientes, así, de manera indirecta al comprar este metal se contribuirá a una minería social, ambiental y económicamente sostenible.

Como valor adicional, se reprocesarán las colas del proceso de beneficio que se tengan acumuladas, el objetivo aparte de aumentar la percepción de ingresos está en aprovechar y realizar procesos de descontaminación de los residuos de la minería que se tienen acumulados y que son cuerpos que representan riesgos latentes de contaminación y posibles desastres naturales.

6.2.3 Relaciones con los clientes y Canales de distribución y Comunicación

Se plantea la creación de una Plataforma Digital, cuyo emprendimiento estaría a cargo de las asociaciones de mineros interesadas en involucrarse en la iniciativa, donde se listen los compradores de oro legales con sus respectivas ofertas de precio, pero a la que también puedan acceder todas las personas que quieran comprar oro, las pequeñas minas de oro, la oferta del metal que estas ofrecen, minas certificadas con algún sello de calidad, compradores de oro certificados y la posibilidad de realizar y establecer negocios a través de esta plataforma, *-al menos al inicio sería un lugar que serviría como medio de comunicación para conocer y establecer contactos y relaciones-*. De esta manera, las relaciones con los clientes y proveedores podrían fortalecerse por medio de los *canales electrónicos*, creando oportunidades para expandir los horizontes de comercialización de los pequeños mineros.

De esta manera, ofertando el stock de mineral de la UP,

se podrían realizar encargos mediante Órdenes por correo, reforzando las relaciones de confianza ya establecidas por los mineros con sus clientes, y creando nuevas relaciones con otros, así, sería posible proyectar ventas, acordando precios y formas de pago garantizando el flujo de ingresos futuros (a corto o mediano plazo), además, a través de este tipo de canales se generaría valor agregado al negocio, pues se contribuiría a la optimización de tiempo y esfuerzo para los clientes.

Por otro lado, atendiendo que existe la posibilidad de acceder a clientes con preferencias de compras distintas, como aquellos que buscan oro responsable, se debe trabajar en la bancarización.

6.2.4 Aliados Clave

Establecer y fortalecer alianzas con las Universidades y los centros de investigación de la región, aprovechando el avance que se ha tenido en proyectos como los de erradicación del mercurio, a través de estrategias de relaciones bien estructuradas donde se garantice el éxito de la implementación de tecnologías limpias y amigables ambientalmente. Las relaciones que se establezcan deben ser bastante estrechas y perdurables en el tiempo, donde la presencia de las instituciones externas en la operación sea constante para que se comiencen a crear procesos de cambio en la estructura del pensamiento de los mineros, así, vincular a las instituciones en los procesos de formalización a través de proyectos de investigación tales como tesis de grado de estudiantes, serían estrategias interesantes que podrían tener éxito, ya que en estos trabajos se busca alcanzar objetivos que en muchos casos deben ser medibles y verificables, lo que obliga a que la labor desarrollada sea más exigente en cuanto a alcanzar resultados y establecer compromisos por parte y parte.

Dentro de la política de formalización minera resultaría necesario, establecer contactos o realizar una “base de datos de proveedores potenciales y legalmente establecidos”, a la cual los mineros puedan acceder, y así establecer contactos para crear relaciones de compra de insumos, con el fin de dinamizar la economía regional y nacional alrededor de la pequeña minería, para esto se puede impulsar una iniciativa como la del “Directorio de posibles proveedores de la Minería por Departamentos” realizada para la minería de Carbón, cuyo objetivo es establecer “una estrategia de largo plazo que permita conectar la oferta de bienes y servicios necesarios para la minería con las expectativas y requerimientos de los productores mineros” [43], estrategia que al igual que para la del carbón estaría liderada por el Gobierno Nacional.

6.2.5 Flujo de ingresos

Los ingresos provendrían de la venta directa del oro, de la recuperación de colas de procesamiento antes almacenadas, de los beneficios en precios al contar con un sello de calidad de oro responsable, ventas a futuro o pagos anticipados de compras, ingresos por capacitaciones respecto al modelo de negocio que funciona, y posibilidad de establecer precios diferenciales por medio del estudio del

perfil del valor del consumidor percibido por los clientes.

6.2.6 Recursos y actividades clave

Para el nuevo modelo, se cuenta con que las tecnologías limpias se constituirían como recursos clave, así como la mano de obra calificada para operar en estos procesos; ya que se conoce que muchas veces a pesar de que se demuestra que sistemas de procesamiento amigables con el ambiente funcionan, no tienen éxito en su establecimiento como método de procesamiento mineral debido al desconocimiento de la manera correcta en que estos trabajan para obtener resultados. A su vez, las tecnologías limpias y la investigación y la caracterización mineralógica se convertirían en las actividades clave del modelo, toda vez que de estas depende el óptimo proceso de recuperación del oro limpio.

6.2.7 Estructura de costos

Adicional a los costos con que se cuenta ahora, se sumarían los costos relacionados con la implementación de tecnologías limpias, inversión en temas de seguridad minera de acuerdo con lo establecido en el Decreto 1888 de 2015, inversión en plataforma WEB y divulgación de esta, mano de obra calificada, inversión en conocimiento del depósito y caracterización mineralógica. Adicional, la distribución de costos actual cambiaría, toda vez que el acceso a explosivos sería legal, se trabajaría por eliminar las extorsiones y se eliminaría el uso del mercurio del proceso y en caso de ser posible el uso de cianuro.

La formalización para los pequeños mineros en el territorio Nacional se puede llevar a cabo por los mecanismos de Subcontrato de Formalización, Contrato de operación, Cesión de Áreas o por medio de la figura de Áreas de Reserva Especial (ARE), incurriéndose en gastos particulares en el proceso de formalización de acuerdo a la figura que a la se cobije el proceso.

7. Conclusiones

Se prevé que las condiciones del mercado del oro serán favorables, al menos en el mediano plazo, atendiendo a las tensiones comerciales que sostienen las dos potencias económicas más grandes del mundo, Estados Unidos y China, creándose entonces un entorno macroeconómico positivo para las actividades de explotación minera de oro, ambiente propicio para impulsar todas las ideas y estrategias planteadas de manera conceptual en el Modelo de Negocios con el que se busca apoyar y facilitar los procesos de formalización de la UP.

Estudiar la pequeña minería Informal de oro, desde una perspectiva de desarrollo de Modelo de Negocio Sostenible bajo la metodología del modelo Cavas resulta interesante, toda vez que mediante el desarrollo de esta, se abarca la actividad minera de manera holística, estudiando directa e indirectamente muchos de los actores que se mueven alrededor de la actividad extractiva y que pueden pasar desapercibidos bajo otros tipos de enfoques direccionados al estudio de la unidad de producción minera, los cuales al

buscar lograr un fin particular se enfocan solo en un objetivo descuidando otros aspectos que pueden ser de gran utilidad al momento de definir estrategias.

Desarrollar con éxito un Modelo de Negocio Sostenible para la Pequeña Minería Informal de Oro trae grandes retos, dado que el contexto social donde se ejecutan la mayoría de las actividades mineras es bastante complejo, puesto que existen dinámicas donde se involucran intereses de actores que operan bajo la figura de la ilegalidad y la criminalidad, fenómenos que afectan directamente los rendimientos y el modo en que se concibe el negocio por parte de los mineros de pequeña escala, ya que muchas de las decisiones que ellos tomen estarán supeditadas a las exigencias de estos grupos.

Se ve una oportunidad enorme en el uso del método del lienzo para empezar a entender mejor el comportamiento de la pequeña minería, pues obliga a establecer relaciones entre los distintos componentes de una unidad de negocio, incentivando la creación de nuevas ideas que buscan enlazar cada componente de la firma para generar nuevas proposiciones de valor a partir de los mismos elementos con que siempre se ha contado. Adicional, escalando el método para descifrar el Modelo de Negocio imperante a escalas más grandes, se puede alcanzar a comprender lo que proponen [6], cuando dicen que los esfuerzos de formalización del sector de Minería Artesanal y de Pequeña Escala no deben ser meramente sensibles a los regímenes de tenencia de la tierra, sino que también deben tener en cuenta los arreglos organizativos existentes dentro de las fuerzas de trabajo y otros normalmente más poderosos; es allí, en la identificación de los arreglos organizativos donde se puede aprovechar al máximo la metodología de Osterwalder para la creación y/o identificación de Modelos de Negocio.

Referencias

- [1] Zvarivadza, T. and Nhleko, A.S., Resolving artisanal and small-scale mining challenges: Moving from conflict to cooperation for sustainability in mine planning. *Resources Policy*. 56, pp. 78-86, 2018. DOI: 10.1016/j.resourpol.2017.12.003
- [2] Hilson, G., What is wrong with the global support facility for small-scale mining?. *Progress in Development Studies*, 7(3), pp. 235-249, 2007. DOI:10.1177/146499340700700304
- [3] Saldarriaga-Isaza, A., Arango, S. and Villegas-palacio, C., A behavioral model of collective action in artisanal and small-scale gold mining. *Ecological Economics*, 112, pp. 98-109, 2015. DOI: 10.1016/j.ecolecon.2015.02.002
- [4] Zvarivadza, T., Artisanal and small-scale mining as a challenge and possible contributor to sustainable development. *Resources Policy*. V. 56, pp. 49-58, 2018. DOI: 10.1016/j.resourpol.2018.01.009
- [5] Siegel, S. and Veiga, M.M., Artisanal and small-scale mining as an extralegal economy: De Soto and the redefinition of "formalization" *Resources Policy*, 34, pp. 51-56, 2009. DOI: 10.1016/j.resourpol.2008.02.001
- [6] Verbrugge, B. and Besmanos, B., Formalizing artisanal and small-scale mining: Whither the workforce?. *Resources Policy*, 47, pp. 134-141, 2016. DOI: 10.1016/j.resourpol.2016.01.008
- [7] Santos, B., Santibañes, E. and Barbosa, G., Decision-support models for sustainable mining networks: fundamentals and challenges. *Journal of Cleaner Production*, 112, pp. 2145-2157, 2016. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.09.023
- [8] Boons, F., Baumann, H. and Hall, J., Conceptualizing sustainable development and global supply chains. *Ecological Economics*, 83, pp. 134-143, 2012. DOI: 10.1016/j.ecolecon.2012.05.012
- [9] Contraloría. Formalización de la minería en Colombia 2010- 2016. Dirección de estudios sectoriales. 2017. [Consulta 07 de mayo de

- 2018]. Disponible en: <https://www.contraloria.gov.co/documents/20181/452120/Informe+formalizaci%C3%B3n+de+la+min%C3%ADa+en+Colombia+2010+-+2016.pdf/6808405f-271f-47d6-a2bc-5f8a15ea4868?version=1.1>
- [10] Ministerio de Minas y Energía (MME). Política nacional para la formalización de la minería en Colombia, 2014. [Consulta 05 de junio de 2017]. Disponible en: <https://www.minminas.gov.co/documents/10180/581708/DocumentoPolíticaVersionFinal.pdf/9fd087db-7849-4728-92ff-6e426accf9c>
- [11] Alves, W., Ferreira, P. and Araújo, M., Mining cooperatives in Brazil: an overview. *Procedia Manufacturing*, 13, pp. 1026-1033, 2017. DOI: 10.1016/j.promfg.2017.09.108
- [12] Zott, C., Amit, R. and Massa, L., The business model: Recent Developments and Future Research, *Journal of Management*, 37(4), pp. 1019-1042, 2011. DOI: 10.1177/0149206311406265
- [13] Evans, S., Vladimirova, D., Holgado, M., Fossen, K., Van Yang, M., Silva, E.A. and Barlow, C.Y., Business model innovation for sustainability: towards a unified perspective for creation of sustainable business models. *Business Strategy and the Environment*, 26, pp. 597-608, 2017. DOI: 10.1002/bse.1939
- [14] Upward, A. and Jones, P., An ontology for strongly sustainable business models: defining an enterprise framework compatible with natural and social science. *Organization and Environment*, 29, pp. 1-31, 2015. DOI: 10.1177/1086026615592933
- [15] Bocken, N., Short, S., Rana, P. and Evans, S., A value mapping tool for sustainable business modelling. *Corporate Governance*, 13, pp. 482-497, 2013. DOI: 10.1108/CG-06-2013-0078
- [16] Geissdoerfer, M., Vladimirova, D. and Evans, S., Sustainable business model innovation: a review. *Journal of Cleaner Production*, 198, pp. 401-416, 2018. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.06.240
- [17] Turner, K., Badura, T. and Ferrini, S., Valuation, natural capital accounting and decision support systems: process, tools and methods. *CSERGE*, University of East Anglia, Norwich, pp. 4-66, 2019. [Consulta 04 de diciembre de 2019]. Disponible en: https://ec.europa.eu/environment/nature/capital_accounting/pdf/EU_NCA_SynthReport_4_2_CSERGE_Year2_190115_sent.pdf
- [18] Papista, E. and Krystallis, A., Investigating the types of value and cost of green brands: proposition of a conceptual framework. *Journal of Business Ethics*, 115(1), pp. 75-92, 2012. DOI: 10.1007/s10551-012-1367-6
- [19] Holbrook, M.B., Consumption experience, customer value, and subjective personal introspection: an illustrative photographic essay. *Journal of Business Research*, 59(6), pp. 714-725, 2006. DOI: 10.1016/j.jbusres.2006.01.008
- [20] Osterwalder, A. and Pigneur, Y., Business model generation: a handbook for visionaries, game changers, and challengers. In: Clark, T., Ed., Hoboken, John Wiley and Sons, Inc, New Jersey, USA, 2010.
- [21] Fedesarrollo. Minería informal aurífera en Colombia - Principales resultados del levantamiento de la línea de base. [en línea]. 2014, pp. 1-89. [Consulta 15 de enero de 2017]. Disponible en: https://www.repository.fedesarrollo.org.co/bitstream/handle/11445/368/Mineria%20informal%20aurifera%20en%20Colombia%20-%20Informe_linea_base_mineria_informal%20-%20pagina%20Fedesarrollo.pdf;sequence=3
- [22] Márquez-García, J., Innovación en modelos de negocio: la metodología de Osterwalder en la práctica. *Revista MBA EAFIT*. [en línea]. pp. 30-47, 2010. [Consulta 22 de enero de 2017]. Disponible en: <https://www.eafit.edu.co/revistas/revistamba/Documents/innovacion-modelo-negocio.pdf>
- [23] World Gold Council - WGC. Gold data, [en línea]. 2018a. [Consulta 25 de septiembre de 2018]. Disponible en: <https://www.gold.org/data>
- [24] World Gold Council - WGC. Global Gold Demand. Sources of gold demand, [en línea]. 2018b. [Consulta 25 de septiembre de 2018]. Disponible en: <https://www.gold.org/about-gold/gold-demand>
- [25] OROINFORMACIÓN. La producción minera de oro alcanzó un nuevo récord histórico en 2018: 3.503 toneladas, [en línea]. 04 de abril de 2019. [Consulta 17 de mayo de 2019]. Disponible en: <https://oroinformacion.com/la-produccion-minera-de-oro-alcanzo-un-nuevo-record-historico-en-2018-3-503-toneladas/>
- [26] Unidad de Planeación Minero Energética - UPME. Actualización estudio oro, plata y platino, [en línea]. 2013a. [Consulta 26 de mayo de 2017]. Disponible en: <https://bdigital.upme.gov.co/bitstream/001/936/2/v.2.%20ACTUALIZACION%20C3%93N%20DEL%20ESTUDIO%20MERCADO%20DE%20ORO%20C%20PLATA%20Y%20PLATINO.pdf>
- [27] Unidad de Planeación Minero Energética - UPME. Indicadores de la minería en Colombia. Bogotá D.C., [en línea]. 2014. [Consulta 26 de mayo de 2017]. Disponible en: http://www1.upme.gov.co/simco/Cifras-Sectoriales/EstudiosPublicaciones/Indicadores_de_la_mineria_en_Colombia.pdf
- [28] Banco de la República. Boletín Económico Regional II. Boletines publicados Noroccidente, [en línea]. 2019. [Consulta 11 de agosto de 2019]. Disponible en: <https://www.banrep.gov.co/es/ber>
- [29] Banco de la República. Boletín Económico Regional II Trimestre de 2020 Noroccidente, [en línea]. 2020a. [Consulta 06 de noviembre de 2020]. Disponible en: https://repositorio.banrep.gov.co/bitstream/handle/20.500.12134/9909/ber_noroccidente_II_trim_2020.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [30] Banco de la República. Proyecciones macroeconómicas de analistas locales y extranjeros, [en línea]. 2019b. [Consulta 25 de abril de 2020]. Disponible en: <https://www.banrep.gov.co/es/proyecciones-macroeconomicas-analistas-locales-y-extranjeros>
- [31] Ministerio de Minas y Energía - MINMINAS. Censo Minero Departamental 2010 - 2011. Bogotá D.C., [en línea]. 2012. [Consulta 12 de octubre de 2017]. Disponible en: <https://www.minminas.gov.co/documents/10180/698204/CensoMinero.pdf/093cec57-05e8-416b-8e0c-5e4f7c1d6820>
- [32] Ministerio de Minas y Energía - MINMINAS. Censo Minero Departamental Colombiano. [en línea]. (Sin Fecha). [Consulta 12 de octubre de 2017]. Disponible en: <https://repositorio.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/2923/%5B16%5D%20Censo%20Minero%20Departamental%20Colombiano.pdf?sequence=20&isAllowed=y>
- [33] OCDE. Debida diligencia de la cadena de suministros de Oro Colombiana: Perspectivas Generales, [en línea]. 2016, pp. 1-48. [Consulta 02 de enero de 2019]. Disponible en: <https://mneguidelines.oecd.org/Colombia-gold-supply-chain-overview-ESP.pdf>
- [34] El Espectador. Colombia fue aceptado como nuevo integrante de la OCDE, [en línea]. 25 de Mayo de 2018. [Consulta 30 de enero de 2019]. Disponible en: <https://www.elespectador.com/noticias/economia/colombia-fue-aceptado-como-nuevo-integrante-de-la-ocde/>
- [35] Comisión Colombiana de Recursos y Reservas Minerales - CCRR. Estándar Colombiano para el reporte público de resultados de exploración, recursos y reservas minerales - ECRR - 2018. Disponible en: https://www.anm.gov.co/sites/default/files/DocumentosAnm/2758_publica_cuadernos_espanol_mp.pdf
- [36] Agencia Nacional de Minería - ANM, ANM lista para la estandarización de recursos y reservas minerales. [en línea]. 2016. [Consulta 17 de febrero de 2018]. Disponible en: https://www.anm.gov.co/?q=anm_lista_para_la_estandarizacion_de_recursos_y_reservas_mineras_boletin_prensa
- [37] MinMinas - ANM. Colombia hace historia al ingresar a Comité Internacional de países mineros, [en línea]. 24 de mayo de 2018. [Consulta 30 de enero de 2019]. Disponible en: <https://www.minminas.gov.co/historico-de-noticias/?idNoticia=24009602> [08/10/2018]
- [38] El Colombiano. Existe un cartel de los explosivos, [en línea]. 30 de mayo de 2017. [Consulta 07 de febrero de 2019]. Disponible en: <https://www.pressreader.com/colombia/el-colombiano/20170530/281483571337948>
- [39] Ministerio de Minas y Energía - MINMINAS. Producción y exportaciones de metales preciosos en Colombia, [en línea]. 2018, pp. 1-56. [Consulta 16 de febrero de 2019]. Disponible en: <https://www.minenergia.gov.co/documents/10192/23966843/Produccion+y+exportaciones+Metales+Preciosos+2018.pdf/935b8e9a-3420-4f7d-a4b2-92161b4d997f>
- [40] Herrera-Echeverri, A., Prácticas de responsabilidad social empresarial de las empresas mineras auríferas en el municipio de

- Segovia - Antioquia, como aporte al desarrollo sostenible en la subregión del nordeste antioqueño. Tesis Dr., Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, Colombia, [en línea]. 2017. Disponible en: <https://repository.upb.edu.co/bitstream/handle/20.500.11912/3099/Proyecto%20de%20Grado%20-%20Abelardo%20Herrera.pdf?sequence=1>.
- [41] El Tiempo. La "peste" plateada que ataca a los pueblos del oro, [en línea]. 21 de octubre del 2010a. [Consulta 26 de julio de 2018]. Disponible en: <https://www.eltiempo.com/archivo/documento/MAM-4209042>
- [42] Congreso de Colombia. Ley No. 1658 del 15 de julio de 2013.
- [43] Unidad de Planeación Minero Energética - UPME. Boletín estadístico de Minas y Energía 2012 - 2016, [en línea]. 2016. [Consulta 14 de diciembre de 2018]. Disponible en: <http://www1.upme.gov.co/Paginas/Noticias/BOLETIN-ESTAD%C3%8DSTICO-DE-MINAS-Y-ENERG%C3%8DA-2012--2016.aspx>

D.A Velilla-Avilez, es Ing. de Minas y Metalurgia de la Facultad de Minas de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. MSc. en Ingeniería – Recursos Minerales en la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Se encuentra vinculado laboralmente a la empresa Mineros S.A., donde se desempeña como Ingeniero de Producción.
ORCID: 0000-0002-3673-9734

O.J Restrepo-Baena, es Ing. de Minas y Metalurgia de la Facultad de Minas de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. MSc. en Evaluación de Impactos Ambientales y Dr. en Metalurgia y Materiales en la Universidad de Oviedo, España. Realizó estancia Post- Doctoral en el laboratorio de I+D de la Empresa Nubiola en Barcelona, España, donde además se desempeñó como director de Investigación y Desarrollo. Se encuentra vinculado como docente en el Departamento de Materiales y Minerales de la Facultad de Minas de la Universidad Nacional de Colombia y es miembro del el Instituto de Minerales – CIMEX, donde participa en proyectos de investigación y se encarga del área de Metalurgia Extractiva: procesos físico-químicos asociados a la industria metalúrgica y coordinador del grupo de Sostenibilidad en industrias Extractivas. Hace parte del Grupo del Cemento y Materiales de Construcción, clasificado A1 por Colciencias.
ORCID: 0000-0003-3944-9369



Theoretical methodological aspects about earthquake prediction

Liber Galbán-Rodríguez ^a

^a Facultad de Construcciones, Departamento de Ingeniería Hidráulica. Universidad de Oriente, Santiago de Cuba, Cuba. liberg@uo.edu.cu

Received: February 22th, 2021. Received in revised form: February 27th, 2021. Accepted: March 01st, 2021.

Abstract

Earthquakes are the geological events that have generated the most transformations in the history of our planet. Although to date scientists have not been able to predict or forecast an earthquake, the detailed knowledge of its genesis, the constant and combined application of the different theories and methods that have been designed for these tasks; as well as, the application of a set of regional studies and governmental, local organizational and executive measures could reduce the high-risk situations that exist today in several countries. On this occasion, a tour of the main edges of these issues is made, starting from its conceptual framework, some of the main earthquake prediction theories invented by man to date are reviewed, so that scientists and decision-makers at the international level They can apply the methodological precepts exposed to their daily work.

Keywords: prediction; earthquake; methodology; forecast; seism.

Aspectos teórico-metodológicos sobre la predicción de terremotos

Resumen

Los terremotos son los eventos de origen geológico que más transformaciones han generado en la historia de nuestro planeta. Si bien hasta la fecha los científicos no han podido predecir o pronosticar un terremoto, el conocimiento detallado de su génesis, la aplicación constante y combinada de las distintas teorías y métodos que se han diseñado para estas tareas; así como, la aplicación de un conjunto de estudios regionales, medidas organizativas y ejecutivas gubernamentales y locales, podrían reducir las altas situaciones de riesgo que hoy existen en varios países.

En esta ocasión se realiza un recorrido por las principales aristas de estas temáticas, partiendo de su marco conceptual, se revisan algunas de las principales teorías de predicción de terremotos inventadas por el hombre hasta la fecha, de manera que los científicos y decisores a nivel internacional puedan aplicar los preceptos metodológicos expuestos a su trabajo diario.

Palabras clave: predicción; terremoto; metodología; pronóstico; sismo.

1. Introducción

Los sismos o terremotos, por sus características, constituyen sin lugar a dudas uno de los fenómenos naturales más importantes debido a la rapidez de su aparición, sin que nada prácticamente indique su presencia y los efectos secundarios que producen en los suelos y edificaciones, impactando negativamente en la vida del hombre y sus bienes. La ocurrencia cada vez más frecuente de desastres ocasionados por los sismos, está poniendo en cuestionamiento la sostenibilidad de las ciudades y poblados, al generar destrucción masiva de estructuras físicas, pérdidas de vidas humanas, materiales y económicas incalculables, interrupción de actividades en distintos sectores y, en algunos casos, crisis sucesivas en el estado de salud de las personas sobrevivientes; además de la pérdida de capacidad de los gobiernos para recuperarse del impacto en un tiempo

relativamente corto. Lo cierto es que su número cada año se dispara (Tabla 1).

Hasta la actualidad la ciencia no ha encontrado fórmulas o maneras idóneas para predecir los terremotos con exactitud, lo único que saben los científicos hasta la fecha es cuáles son las zonas de conflicto y la frecuencia aproximada de los terremotos más intensos. Independientemente a estas consideraciones, lo cierto es que sólo una vez en la historia reciente los sismólogos lograron anticipar con éxito un gran terremoto y establecer comunicación y medidas gubernamentales para evacuar a la población.

La predicción ocurrió días antes del 4 de febrero de 1975, cuando un destructivo terremoto de 7,3 Richter azotó a la localidad de Haicheng, en el noreste de China, dañando casi la totalidad de las estructuras de la urbe. Distintos fenómenos

Tabla 1.

Números de terremotos mundialmente entre el 2007–2018 (11 años).

Rango de la magnitud	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
8,0–9,9	1	1	1	2	2	2	1	1	1	1	1
7,0–7,9	14	12	17	21	19	15	36	11	19	16	10
6,0–6,9	178	168	144	151	204	129	123	143	127	130	84
5,0–5,9	2074	1768	1896	1963	2271	1412	1402	1577	1413	1550	904
4,0–4,9	12080	12292	6805	10164	13303	10990	9795	14941	13239	13701	8769
Total	14350	14240	8862	12300	15798	12548	11341	16674	14797	15397	9785

Fuente: [1].

inusuales fueron algunas de las señales de alerta. Unas horas antes se había emitido una inédita alerta por especialistas del servicio geológico chino ubicado en la localidad de Yingkou advirtiéndole de la catástrofe, por lo que la población fue evacuada y la mayoría de los habitantes logró sobrevivir.

A principios de los años 70 del siglo XX estaba en boga la “teoría de la dilatación”, que indica que cuando se comprime una roca (tal y como ocurre en los límites de fallas, principalmente las que forman los sistemas de fallas de los límites de las placas), ésta cambia sus propiedades físicas, originando una serie de señales que son consideradas precursoras de los terremotos. Estos indicios se pudieron observar en Haicheng antes del sismo gracias al monitoreo que realizaron expertos liderados por Cao Xianqing, jefe de la Oficina Sismológica de Yingkou. Entre los fenómenos que se detectaron en los días previos, se cuentan cambios en la conductividad eléctrica de la tierra y en la velocidad de propagación de las ondas P y S (primarias o compresionales, y secundarias o transversales), así como alteraciones en el nivel de gas radón [2]. También se observó un aumento en el nivel del agua de los pozos, “porque cuando se comprime una roca, el agua que está contenida al interior de la roca, que actúa como una esponja, aflora”. Otras situaciones que llamaron la atención de los científicos, fueron cambios en el comportamiento de los animales. Era febrero en el hemisferio norte, hacía mucho frío, y algunos animales que hibernan, como cierto tipo de culebras, salieron a la superficie y murieron congeladas. [2]

Lo determinante para decretar la evacuación de la población fue la ocurrencia de una serie de “foreshocks” o temblores pequeños, considerados “precursores” de terremotos. Durante la madrugada del 4 de febrero de 1975 se registran varios de estos sismos, incluyendo uno que alcanzó una magnitud 5,1 Richter a las 7:51 AM. Poco después, a las 8:15 AM, se realizó una reunión de emergencia en la que el científico Cao Xianqing advirtió a las autoridades que un gran terremoto podía ocurrir ese mismo día, por lo que se debían adoptar medidas. Tras la cita, el gobierno local dispuso un amplio operativo para evacuar a la población, incluyendo las zonas urbanas y rurales, y al mediodía ésta ya se había concretado. A esa misma hora, Cao notó que había disminuido la actividad telúrica, lo que para él significaba que se comenzaba a acumular la energía final antes del gran terremoto que finalmente ocurrió a las 7:36 PM y fue de magnitud 7,3 Richter. [2]

De acuerdo a los reportes de la época, unas 2 mil personas murieron a causa del terremoto en Haicheng, pero de no haberse decretado la evacuación de la población se estima que la cifra habría superado las 100 mil víctimas. Éste es el

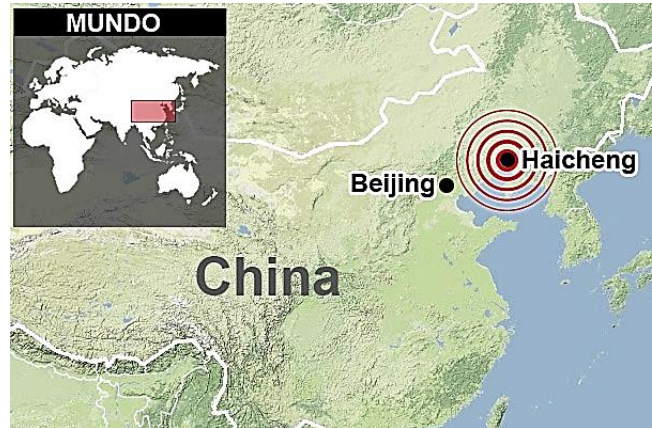


Figura 1. Mapa de localización de la localidad de Haicheng, en China, impactada por un fuerte terremoto en 1975.

Source: https://centinela66.files.wordpress.com/2012/07/mundo_162426.jpg



Figura 2. Imágenes de los daños causados por el impacto en 1975 a la localidad de Haicheng, en China, del único terremoto que la ciencia ha podido predecir.

Source: https://historiaybiografias.com/archivos_varios4/terremoto.jpg. <https://ugc.kn3.net/i/760x/http://aslcristian.files.wordpress.com/2010/11/terremoto-de-china-asia2.gif>

único caso de predicción de un terremoto que ha sido reconocido por el mundo científico como verdaderamente certero. Haicheng fue el emblema de que la predicción de terremotos era posible y, que era cuestión de observar ciertos fenómenos para tener la respuesta. En ese momento todos creían que el problema de la predicción estaba resuelto, pero este entusiasmo duró muy poco tiempo. (Figs. 1 y 2)

Al año siguiente, el 28 de julio de 1976, en Tangshan, a sólo 400 kilómetros de Haicheng, se produjo otro terremoto de 7,5 Richter que causó la pérdida más grande de vidas humanas que se conoce tras un terremoto: 250 mil personas fallecieron según fuentes chinas, y 800 mil, de acuerdo a estimaciones occidentales. Este terremoto no se pudo anticipar, pese a que fue parecido al de Haicheng y a que se estaba realizando el mismo tipo de monitoreo. La diferencia es que esta vez no se presentó ninguno de los fenómenos

precursores que estuvieron en el primer caso [2]. Con este episodio quedó demostrado que estos fenómenos llamados precursores, no siempre se presentan antes de un temblor.

Tras el fracaso de esta teoría, la comunidad científica se desmotivó. De lo que se creía era un logro, que ya estaba prácticamente el problema resuelto, se pasó a una situación en la que nuevamente hay muchas incertidumbres. Pese a ello, en algunas zonas altamente sísmicas del planeta aún se realizan experimentos asociados a esta hipótesis de la dilatación de las rocas.

Se han producido muchas teorías y predicciones pseudocientíficas. La aleatoriedad natural de los terremotos y la actividad sísmica frecuente en ciertas áreas, pueden ser utilizadas para hacer "predicciones" que generen credibilidad injustificada. Generalmente, tales predicciones dejan ciertos detalles sin especificar, lo que incrementa la probabilidad de que los vagos criterios de predicción se reúnan y se ignoren los terremotos que no fueron previstos. A continuación, se refieren algunos de los preceptos teórico- metodológicos empleados hoy día para la predicción de terremotos.

2. Generalidades de la predicción de terremotos

La predicción del terremoto tiene sus raíces en la antigüedad. Estas predicciones se han basado en una variedad de fenómenos sísmicos y no sísmicos. Varias culturas antiguas consideraban que los terremotos y otros fenómenos naturales peligrosos (erupción volcánica, tormentas e inundaciones fundamentalmente) se producían por la ira de los dioses "cuando los humanos no cumplían con sus designios". En la mitología griega, Poseidón, el dios del mar, también el dios de los terremotos (en la mitología romana es conocido como Neptuno), se creía que cuando estaba de mal humor, golpeaba el suelo con un tridente, causando terremotos y otras calamidades. Esto significaba que cuando el mar estaba revuelto, se veía venir grandes tormentas (por el estado de las nubes y los truenos) o sentían intensas jornadas de calor, se creía que el dios Poseidón traería un terremoto, en aquella época conocido como gran temblor de tierra.

Por otro lado, los filósofos griegos de la antigüedad clásica desarrollaron ideas para explicar a su pueblo el origen de los sismos. [3] menciona las ideas de Aristóteles que lograron llegar hasta nuestros días. Esta hipótesis aristotélica refiere que en el centro de la tierra existe un fuego permanente que genera gases o exhalaciones que al desplazarse en el interior de la tierra provocan los temblores. En función de esto, también se creía que cuando se sentían intensas jornadas calurosas es porque iba a temblar.

Estas creencias ataban a las tribus y comunidades antiguas a seguir determinados patrones culturales, de disciplina, de comportamiento para evitar la furia de estos dioses; aun así, de vez en cuando la naturaleza seguía su curso, y la culpa de estos fenómenos seguía teniendo la misma explicación. Se sucedieron muchos esfuerzos de distintos filósofos y científicos desde esta época antigua hasta que, a mediados del siglo XIX de nuestra era, aparecieran las publicaciones de los trabajos científicos de Jhon Mitchel, Robert Malet, Charles Darwin, Alejandro de Humboldt, entre otros que dieron un giro a la sismología, a las creencias y las maneras de intentar predecir o pronosticar los terremotos.

Lo cierto es que la predicción de terremotos ha sido hasta la actualidad un desafío para la ciencia a nivel internacional. Varios investigadores, principalmente de naciones desarrolladas, han intentado elaborar teorías y metodologías para descifrar el momento en que va a suceder un terremoto de gran magnitud. En este intento han existido algunos aciertos, como la predicción realizada del terremoto de Haicheng en el noreste de China días antes su impacto el 4 de febrero de 1975; sin embargo, todavía existe una gran incertidumbre en el tema, debido a que la mayoría de estos estudios no se aproximan a la realidad, solo existen escasas coincidencias.

El autor de este trabajo define a la **predicción de terremotos** como el esfuerzo por pronosticar la ocurrencia de un terremoto en una región o localidad del planeta con una magnitud determinada en un momento dado; o sea, es la posibilidad de predecir la ocurrencia de un movimiento sísmico fuerte en un lapso de tiempo determinado en una localidad específica. En otras palabras, se trata de pronosticar la ocurrencia de terremotos en función de su localización geográfica, del tiempo y de su magnitud.

Actualmente existen científicos que prefieren denominar como *pronóstico* a los esfuerzos por descifrar cuándo va a ocurrir un terremoto de gran magnitud; en ambos casos se refiere al proceso de estimación en situaciones de incertidumbre. Según Kanamori [4] toda predicción sísmica debe incluir:

- Intervalo de tiempo definido.
 - Lugar definido.
 - Magnitud del evento.
 - Nivel de confianza del pronóstico.
 - Estimación del grado de incertidumbre del pronóstico.
 - Propuesta de las indicaciones en caso de ocurrir el sismo.
- La predicción sísmica es importante porque:
- Permite preparar los servicios de emergencia.
 - El gobierno puede emitir alertas a la población
 - Los habitantes pueden buscar un lugar seguro
 - Se cerrarían tuberías de gas o combustible y de esta forma se evitarían incendios.

Hasta la fecha, y a pesar de considerables esfuerzos de investigación por parte de los geólogos y sismólogos principalmente, no se han podido hacer predicciones científicamente reproducibles para un día o mes específico. No obstante, en el caso de los mapas de evaluación del peligro sísmico de fallas estudiadas, es posible estimar que la probabilidad de un terremoto de un tamaño dado afectará un lugar determinado durante un cierto número de años teniendo en cuenta el patrón de velocidad de corrimiento y las evidencias de movimientos sísmicos anteriores [5], tal y como ocurre con la Falla San Andrés ubicada en Norteamérica. La capacidad general para predecir terremotos con un porcentaje de exactitud relativamente elevado, ya sea en forma individual o en una base estadística, sigue siendo remota.

En el esfuerzo por predecir o pronosticar terremotos, se ha tratado de asociar un terremoto inminente con fenómenos tan variados como los patrones de sismicidad, campos electromagnéticos, movimientos del suelo, condiciones meteorológicas y nubes inusuales, contenido de gas radón o hidrógeno del suelo o agua subterránea, comportamiento

animal y las fases de la luna, determinaciones probabilísticas con el empleo de métodos matemáticos, equipamiento que analiza las ondas precedentes y emite alertas, entre otros.

2.1 Criterios para la predicción de terremotos

Atendiendo a diversos criterios la predicción de terremotos se puede clasificar según el tiempo o intervalo tiempo de aparición, según el área geográfica y según las técnicas aplicadas.

Según sea el intervalo de tiempo, se pueden presentar los siguientes plazos [6]:

- Inmediato: 0 a 20 segundos
- Corto: Horas a semanas
- Intermedio: 10 a 30 años
- Largo: Más de 30 años

La predicción inmediata ocurre cuando se emplean sensores remotos para la alerta temprana, permitiendo a las poblaciones más alejadas del epicentro tomar medidas urgentes para resguardarse del impacto del sismo; o sea, ubicarse en las más zonas seguras según el lugar donde se encuentren, de manera que el colapso de las estructuras impactadas por el sismo no los afecte o los afecten lo menos posible.

La predicción a corto plazo, debe brindar el lugar, la fecha y la magnitud del evento. Este tipo de predicción es el más difícil porque generalmente está asociada a un grado alto de incertidumbre. Existen múltiples factores que se han tratado de relacionar con la ocurrencia de un terremoto para tratar de encontrar una clave en la predicción. Dentro de los más populares están los cambios de potencial eléctrico, variación química del agua subterránea, cambios en la profundidad de los pozos de agua, niveles de gas radón liberado a la atmósfera cerca de una falla e incluso comportamiento animal extraño. [6]

La predicción a corto plazo más espectacular tuvo lugar en 1975 en ciudad de Haicheng en China. El 1 de febrero de 1975 comenzó a detectarse una oleada de sismos que continuó dos días más al tiempo que se observaron cambios en diversos parámetros físicos como el nivel de agua de los pozos. Como la actividad se incrementaba, se tomó la decisión de evacuar a las personas de la ciudad y el 4 de febrero ocurrió un fuerte terremoto de magnitud 7.3.

La predicción a largo plazo es una de las más usadas. Se basa en la teoría del rebote elástico que supone que, durante largos intervalos de tiempo, el esfuerzo a ambos lados de una falla va incrementándose hasta que esta se rompe y se genera un terremoto. El esfuerzo entonces se libera y se empieza nuevamente a acumular, de manera que en el futuro se vuelve generar un nuevo sismo en el mismo lugar. [6]

Existen tres métodos para la predicción de terremotos a largo plazo:

- Método de la brecha sísmica
- Método de la transferencia de esfuerzos
- Método de cambios en los patrones de sismicidad

Método de la brecha sísmica: Este método supone que, a lo largo de las zonas de contacto entre las placas tectónicas donde no han ocurrido sismos fuertes durante mucho tiempo y el nivel de sismicidad de eventos pequeños es bajo, es un sitio donde la energía se está acumulando y que podría liberarse en forma de un terremoto. (Fig. 3)

El ejemplo más famoso es el de Parkfield, en California,

Estados Unidos. Ahí se había notado que los sismos parecían sucederse con un intervalo de unos 22 años aproximadamente. Un sismo de magnitud de aproximadamente 6.0 ocurría en los años 1857, 1881, 1901, 1922, 1934 y 1966. Se esperaba que el próximo ocurriera a más tardar en 1993. De hecho, los científicos habían calculado que existía una probabilidad de 90 a 95% de que un sismo similar ocurriera entre 1985 y 1993. Sin embargo, el terremoto no ocurrió sino hasta el año 2004. [6] (Fig. 4)

Método de la transferencia de esfuerzos: Cuando ocurre un terremoto grande, los esfuerzos de la falla que lo origina se liberan, pero tienden a concentrarse en las zonas cercanas que, si existen fallas activas, pueden generar a su vez otro sismo en cuestión de décadas.

El ejemplo más notorio es el de un terremoto en 1992 de magnitud 7.3 que ocurrió en Landers, California. Horas después, un sismo de magnitud 6.3 (Big Bear) sucedió en un sistema de fallas cercanas a ese sismo. El evento de 6.3 fue producido por el cambio en los esfuerzos que se generaron cuando rompió la falla del evento mayor. (Fig. 5).

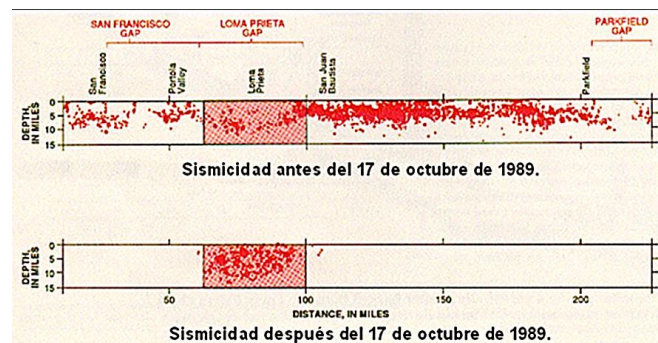


Figura 3. Proyección de eventos sísmicos sobre la falla de San Andrés. En la parte de arriba se muestran los "gaps" o brechas de San Francisco, Loma Prieta y Parkfield. La parte de abajo muestra la sismicidad luego de ocurrido el sismo de Loma Prieta en 1989. El mismo sucede en una zona donde la sismicidad era baja (había un "gap" o brecha) comparada con las zonas vecinas.

Source: [6].

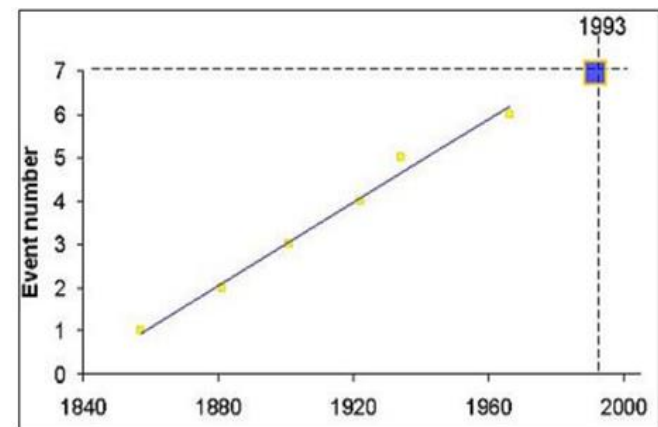


Figura 4. Proyección del año en que debía ocurrir el sismo de Parkfield. Se esperaba que a más tardar el sismo ocurriera en 1993 porque otros eventos similares sucedían en forma muy regular en la misma zona durante muchos años.

Source: [6].

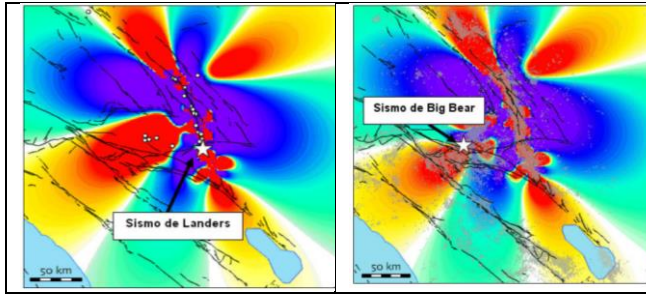


Figura 5. Distribución de esfuerzos luego del sismo de Landers (Izquierda). Distribución de esfuerzos luego de ocurrido el sismo de Big Bear (Derecha). Las partes rojas son las zonas donde se acumuló la energía sísmica. Source: [6]

Método de cambios en los patrones de sismicidad: Estos consisten en observar cambios anómalos en la sismicidad normal de un área. Por ejemplo, puede suceder que no se registren sismos durante muchísimo tiempo y que esto sea indicativo de que un terremoto está a punto de ocurrir. Por otro lado, también se ha observado que algunas veces más bien empiezan a ocurrir muchos sismos donde no eran frecuentes, hasta que se produce un sismo grande.

La predicción de terremotos según el área que se evalúa puede ser:

- Local,
- Regional
- Global

Tanto la predicción local como regional tienen su fundamento en la medición de parámetros locales de los sismos donde se conoce que en el pasado han ocurrido estos fenómenos geológicos por la ruptura abrupta o corrimiento abrupto de fallas tectónicas, ubicadas generalmente en las inmediaciones de los límites tectónicos de las placas. Hoy existen varios investigadores a nivel internacional que trabajan esta línea, con algunos resultados aislados, los más destacados son los obtenidos del estudio del movimiento que experimenta la Falla San Andrés en Estados Unidos (Fig. 6)

Se ha logrado algún progreso en la predicción regional a largo plazo y en los pronósticos. Se han identificado "brechas sísmicas" en las zonas de contacto de las principales placas: las áreas con historia de grandes terremotos en el pasado (mayores de Ms7 - Escala Richter) y de muy grandes terremotos ($Ms > 7,75$), que no han sufrido un evento de esas magnitudes en los últimos 30 años. Los recientes estudios muestran que los principales terremotos no vuelven a ocurrir en el mismo lugar a lo largo de las fallas, hasta que no haya pasado suficiente tiempo para que se acumulen las tensiones, generalmente después de varias décadas.

En las principales regiones sísmicas, estas zonas "en silencio" presentan el mayor peligro de futuros terremotos. Confirmando la teoría de la brecha sísmica, varias "brechas" identificadas cerca de las costas de Alaska, México y América del Sur han experimentado grandes terremotos durante la última década. Aún más, el comportamiento de algunas fallas parece ser sorprendentemente constante: hay áreas donde los terremotos ocurren en el mismo lugar, pero décadas aparte, y tienen prácticamente idénticas características. El monitoreo de estas brechas sísmicas, por lo tanto, es un componente importante respecto a los terremotos, su predicción, y los preparativos para futuros eventos.

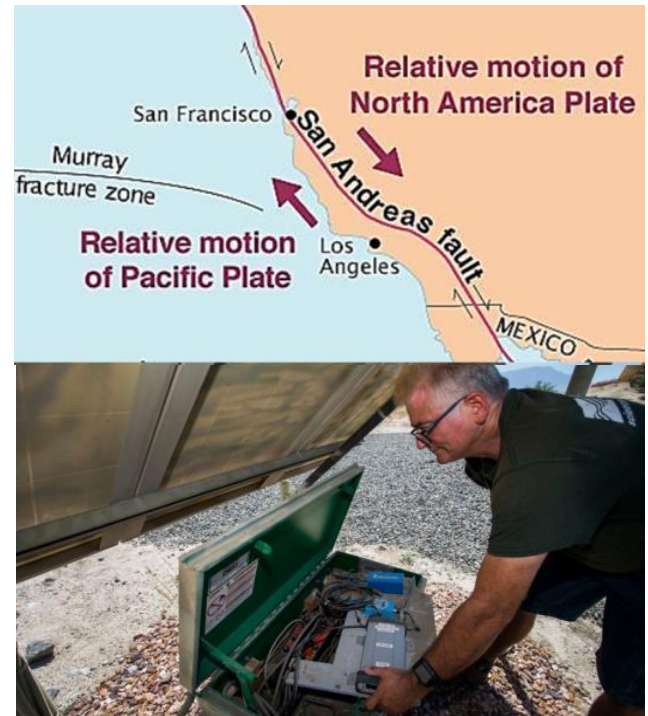


Figura 6. Imagen que muestra el resultado de los estudios locales y regionales realizados por especialistas del Servicio Geológico de los Estados Unidos sobre la Falla San Andrés, determinando que Los Angeles se mueve lentamente acercándose a San Francisco como consecuencia de la actividad sísmica en esta falla.

Source: <https://www.trbimg.com/img-5913869d/turbine/la->

En base a la teoría de la brecha sísmica, el U.S. Geological Survey ha preparado mapas de las costas de América Latina, sobre el Océano Pacífico adaptados de estudios de Stuart Nishenko. Estos mapas dan estimados de probabilidades y clasifican el peligro sísmico para un período de tiempo de 1986 a 2006, sin embargo, los pronósticos de este tipo sólo demarcan áreas relativamente grandes donde un terremoto podría potencialmente ocurrir en un período de tiempo de definición muy general. Ha habido pocas predicciones sísmicas exitosas, y son la excepción no la regla. La predicción de un terremoto involucra el monitoreo de muchos aspectos de la tierra, incluyendo pequeños desplazamientos del terreno, cambios en los niveles del agua, emisiones de gas de la tierra, entre otros. Es aún una ciencia muy joven.

La predicción local o regional se aplica también en ausencia de redes de medición, a las estimaciones probabilísticas de ocurrencia de sismos, teniendo en cuenta la cantidad de veces que ocurren los terremotos y su promedio probabilístico; lo que significa que se establecen "tiempos de recurrencia" a partir de estimaciones probabilísticas. Una técnica de predicción muy antigua, aunque totalmente inexacta hasta la fecha.

En cambio, la predicción global involucra a varias redes de medición en distintas regiones. Estas redes, por ejemplo, combinan sus resultados para establecer patrones de comportamiento y son usadas para los distintos países en particular o conjunto de países. Hoy estas asociaciones para el uso compartido de datos de redes sismológicas son muy

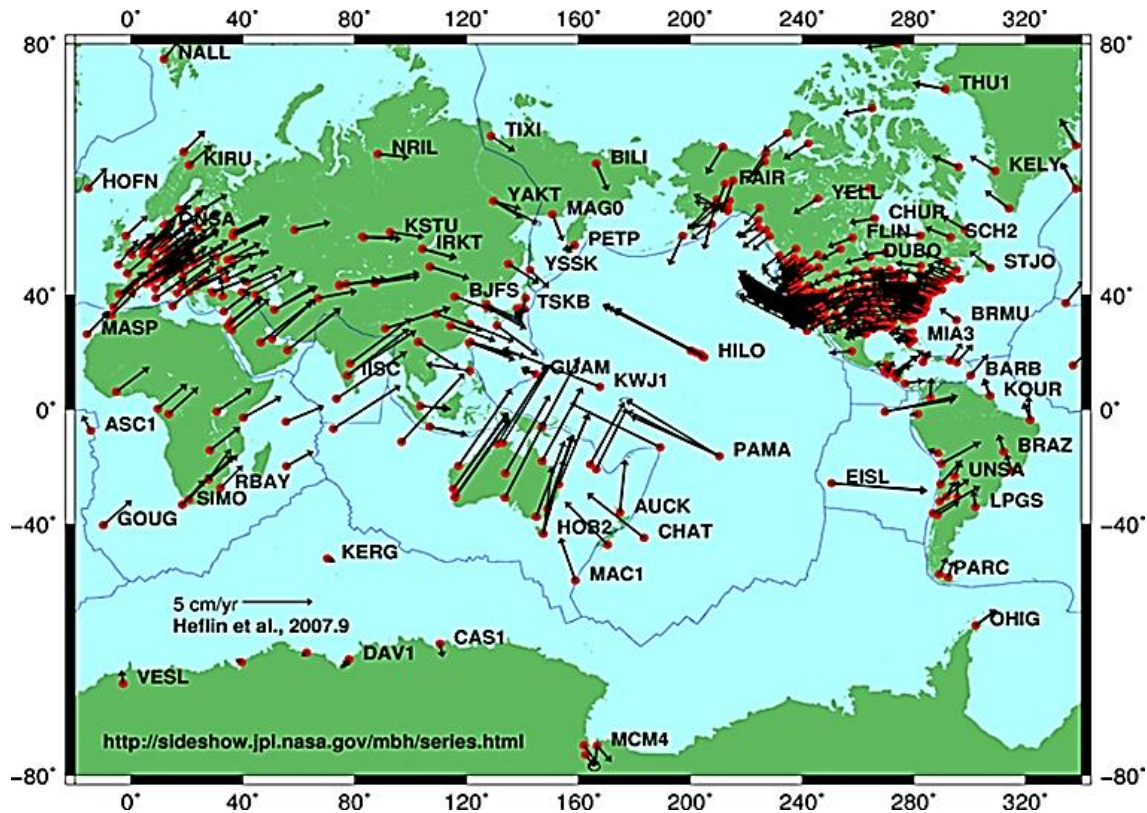


Figura 7. Vectores de velocidad de las placas tectónicas obtenidos mediante posicionamiento preciso GPS.

Source: <http://sideshow.jpl.nasa.gov/mbh/all/images/global.jpg>

comunes internacionalmente. Un ejemplo fehaciente lo constituye el empleo de datos generados por todos los servicios sísmológicos de los distintos países del área del Caribe, para intentar predecir y registrar todos los eventos que ocurren en esta área geográfica. Este tipo de colaboración es muy efectiva, pues permite observar colectivamente la evolución detallada de los movimientos neotectónicos de una región implicada en una placa tectónica específica, y con ello predecir elementos como los posibles movimientos vectoriales futuros, su fuerza (magnitud), estimación de las posibles localidades de colapso, entre otros parámetros importantes.

Particularmente, los movimientos vectoriales de las placas tectónicas con los que se puede modelar el comportamiento sísmico de una región, es realizado a través del empleo de Sistemas de Posicionamiento Global (GPS), una eficiente herramienta de uso actual en las geociencias (Fig. 7).

La predicción de terremotos de forma global comprende la integración de registros sísmicos del globo terráqueo. Actualmente el Servicio Geológico de los Estados Unidos de América (USGS por sus siglas en inglés) promueve efectivamente la realización de estas predicciones; para ello emplea los datos obtenidos por una densa red de sismógrafos colocados en su país y otros obtenidos a través de la colaboración internacional con distintos países. Esta institución registra los terremotos ocurridos en el planeta prácticamente de forma instantánea y procesa sus datos en

tiempo real, realizando sucesivamente algunas predicciones de otros eventos aun inexactas.

Además, existen otras instituciones dedicadas a la llamada predicción o pronóstico de terremotos, como es el caso del Servicio de pronóstico de terremotos (EFS), también conocido como World Earthquakes™, un servicio ofrecido online en internet que se dedica a al pronóstico de terremotos basado en series de datos de terremotos pasados y presentes. Según la política de privacidad establecida por este servicio, los datos de EFS son solo para uso personal y pueden contener errores y no está permitido redistribuir ninguno de los datos de previsión de terremotos que estén disponibles en esta página web, a ninguna otra fuente (TV, Medios, Internet). La intención de EFS es reducir el daño y las víctimas causadas por los terremotos sin crear falsas expectativas. Sus algoritmos matemáticos – según declaran no pueden predecir la hora exacta, la ubicación o la magnitud de un terremoto, se asume que no hay conocimiento para hacer eso (world-earthquakes.com).

Los datos de EFS se basan en estadísticas de terremotos presentes y pasados que no pueden proporcionar un pronóstico preciso; son solo una estimación estadística usando series de datos de terremotos pasados y presentes. Consideran solo series de datos de terremotos de Mw 6.5+. Las listas se pueden actualizar automáticamente debido a la actividad sísmica global. Las probabilidades se calculan con métodos matemáticos complejos y utilizan series de datos EMSC y USGS de terremotos pasados y presentes con

algoritmos que son únicos en el mundo. (world-earthquakes.com).

Según las técnicas aplicadas, la predicción de terremotos puede ser:

- Teórica,
- Instrumental,
- Combinada

La predicción teórica de terremotos se basa fundamentalmente en dos manifestaciones:

- La concepción de eventos premonitores
- La aplicación de métodos matemáticos y estadísticos para predecir eventos futuros conociendo la ocurrencia de eventos sísmicos en el pasado, u otros indicadores o variables que se evalúen en el proceso.

La predicción instrumental de terremotos igualmente tiene dos vertientes:

- A través del registro de los movimientos de las placas empleando sistemas de posicionamiento global (GPS) y su correspondiente interpretación.
- A través del registro de los movimientos sísmicos por los sismógrafos y acelerómetros, u otros medios y su correspondiente interpretación.

La predicción combinada de terremotos emplea tanto la predicción instrumental como la teórica, encerrando estos estudios en la concepción de complejos modelos matemáticos, estadísticos y geofísicos, que finalmente también emplean otras maneras de interpretar las informaciones, entre estas:

- Brain storming (tormenta cerebral), realizada con el auxilio de consejos de expertos.
- Las redes neuronales artificiales.
- Lógica Fuzzy.
- La minería de datos
- El modelo LGR múltiple (Ponderación de resultados de distintos métodos de predicción de terremotos)

Se han producido muchas teorías y predicciones pseudocientíficas. La aleatoriedad natural de los terremotos y la actividad sísmica frecuente en ciertas áreas, pueden ser utilizadas para hacer "predicciones" que generen credibilidad injustificada. Generalmente, tales predicciones dejan ciertos detalles sin especificar, lo que incrementa la probabilidad de que los vagos criterios de predicción se reúnan y se ignoren los terremotos que no fueron previstos.

Viendo la complejidad de los sismos y comprendiendo que hasta los países más desarrollados tecnológicamente no han podido predecirlos, es importante que nosotros tomemos conciencia que estamos expuestos a un fenómeno muy importante y que este puede suceder en cualquier lugar y en cualquier momento.

Podríamos citar el caso del terremoto de Japón del 11 de marzo del 2011. El sismo de 9.0 tomó por sorpresa a los japoneses que más bien esperaban que ocurriera un sismo de aproximadamente magnitud 8.0 en la zona sur del país, conocida como Nankai. La zona norte, aunque presentaba sismicidad "normal", se pensaba que podría algún día romper con un sismo de quizás 8.0, pero no este año, sino en el futuro. Tampoco se pensaba que la magnitud del evento pudiera ser de 9.0 que es 30 veces más grande que uno de 8.0 desde el punto de vista de la liberación de la energía. Todo esto sustentado por años de estudio e investigaciones realizadas por los más prestigiosos sismólogos japoneses. (Fig. 8)

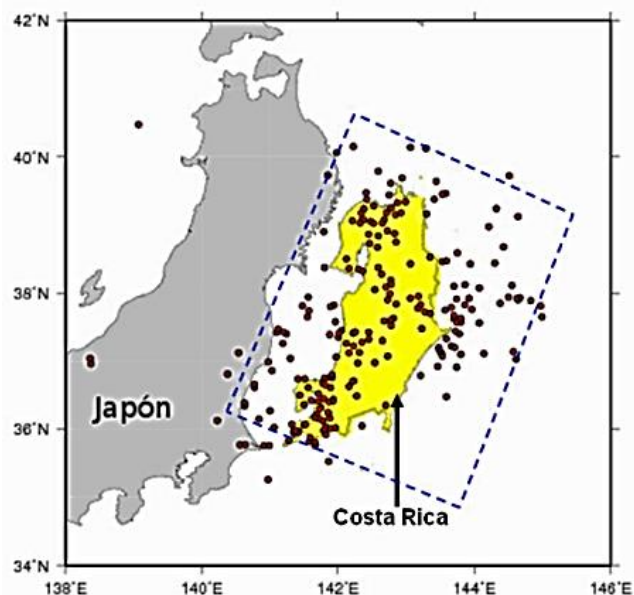


Figura 8. Réplicas del sismo del 11 de marzo del 2011 ocurrido en Japón. Cada punto rojo representa una réplica. La zona en azul, una aproximación del área de ruptura que produjo ese sismo.

Source: (Colectivo de autores, 2015)

El adecuado manejo de la información ante un eventual terremoto, no puede ser tomado a la ligera, mucho menos con la gran cantidad de información (acertada o errónea) que circula en la actualidad. Existen muchos métodos de predicción, algunos tienen más aciertos que otros, sin embargo, todos poseen sus grados de incertidumbre y ninguno de ellos es infalible ni podrá ser 100% seguro. Un aviso de terremoto que circule por la red, debe ser manejado siempre por los encargados de la seguridad ciudadana y cada método aplicado en su predicción debe ser sometido a una serie de cuestionamientos antes de su aprobación definitiva:

- ¿El método ha sido sometido a la comunidad científica?
- ¿Se ha presentado en conferencias y simposios?
- ¿Existen publicaciones científicas que demuestren la veracidad del método?
- ¿Se han hecho análisis de incertidumbre de la información?
- ¿Las predicciones cumplen con informar del lugar, tiempo y magnitud del evento?
- ¿Cuál es la calidad de los datos que se usan?
- ¿Qué instrumentación se ha utilizado?
- ¿Existe información técnica que sustente las predicciones?
- ¿Quiénes son los autores?
- ¿Cuál es la trayectoria de investigación de los desarrolladores, su especialidad?
- ¿Están los autores respaldados por una universidad o instituto de investigación?
- ¿Qué contactos tienen los desarrolladores con la comunidad sismológica?

Es importantísimo tener claro el origen de la información y más aún que esta haya sido evaluada por la comunidad científica a todo nivel, porque se está tratando un tema muy delicado, que puede traer serias consecuencias a la sociedad

civil. Todo método o procedimiento que intente predecir algún fenómeno natural, debe estar debidamente sustentado, hecho por personal académicamente preparado en el campo respectivo y debe ser transparente desde todo punto de vista. El solo hecho de que se pronostique un terremoto sin que se demuestre el procedimiento seguido, pierde toda validez desde el punto de vista científico y más bien se convierte en algo semejante a la clarividencia. (Colectivo de autores, 2015). Por estas razones se sugiere siempre aplicar los métodos existentes de forma combinada, de manera que cada vez sean más certeros los pronósticos o predicciones realizadas.

3. Conclusiones

- Los sismos o terremotos, por sus características, constituyen uno de los fenómenos naturales más importantes debido a la rapidez de su aparición, sin que nada prácticamente indique su presencia y los efectos secundarios que producen en los suelos y edificaciones, impactando negativamente en la vida del hombre y sus bienes.
- Se destaca la existencia de varios métodos o metodologías publicadas por científicos y comunidad en general para predecir terremotos, los cuales hasta la fecha son inexactos. Su aplicación combinada podría reducir las incertidumbres existentes hoy día sobre el tema.

Bibliografía

- [1] USGS, Recent earthquakes. [online]. 2019. Available at: <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/recenteqsww/Quakes/usc0001xgp.php>
- [2] Ramírez, N., La historia del único terremoto que la ciencia ha podido predecir. 19 de Mayo de 2012 | 12:26 |, [en línea]. 2012. Disponible en: www.Emol.com
- [3] García, V., El pensamiento científico sobre el origen de los sismos. En: Los sismos en la historia de México, Fondo de cultura económica, II: 2001, pp. 71-110.
- [4] Kanamori, H. and Hanks, T.C., A moment magnitude scale. Journal of Geophysical Research, 84(B5), pp. 2348-50, 1979.
- [5] Varotsos, P. and Alexopoulos, K., Physical properties of the variations in the electric field of the earth preceding earthquakes, III. Tectonophysics (136), pp. 335-339, 1987.
- [6] Colectivo de autores. Predicción de Terremotos. Laboratorio de Ingeniería Sísmica INII-UCR. [en línea]. 2015. Disponible en: <http://www.lis.ucr.ac.cr/pdf/prediccion/predecir.html>

L- Galbán-Rodríguez, es graduado como Ing. Geólogo en 1995, Dr. en Ciencias Geológicas 2015, todos en la Universidad de Moa (anteriormente: Instituto Superior Minero Metalúrgico), Holguín, Cuba. Actualmente es profesor titular de la Universidad de Oriente en Santiago de Cuba, Cuba. Encargado de las disciplinas de geotecnia e hidrogeología en la carrera de Ingeniería Hidráulica, Facultad de Construcciones. Premio Nacional de la Academia de Ciencias de Cuba, 2014. Sus intereses de investigación se relacionan con evaluación de riesgos y desastres, vulnerabilidad y riesgos de obras hidráulicas, estudios medioambientales, estudios de peligros geológicos, entre otros relacionados.
ORCID: 0000-0002-2377-9008