

SIMULACIÓN DE *TSUNAMIS* GENERADOS POR DESLIZAMIENTOS DE TERRENO EN EL TALUD INSULAR DE CUBA

• Luis Fermín Córdova-López •

Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, (Cujae), Cuba

• Yoany Sánchez-Cruz •

Empresa Aguas de La Habana, Cuba

• Enrique Castellano-Abella •

Instituto de Geología y Paleontología, Cuba

Resumen

Los *tsunamis* son ocasionados generalmente por terremotos. Se revela que alrededor del 30% de las máximas crestas de *tsunamis* es probable que haya tenido relación con masas de terreno que fallaron (Watts *et al.*, 2005). El presente trabajo desarrolla tres casos de estudio a modo de prueba de posible deslizamiento submarino y subaéreo en diferentes lugares del talud insular de Cuba. Tomando los parámetros de estos deslizamientos se hace la generación y propagación de la ola provocada por los deslizamientos, para conocer sus efectos sobre la línea de costa. Los resultados obtenidos permiten definir la altura de ola creada, comportamiento de la misma a lo largo del perfil, trepada y efecto en el interior de una bahía, elementos necesarios para el cálculo del impacto en zonas costeras.

Palabras clave: *tsunami*, inundación, oleaje, deslizamientos submarinos, deslizamiento aéreo.

Introducción

En la región del Caribe se han registrado 97 *tsunamis* desde 1498 hasta 1997. Estos eventos han impactado por elevación del nivel del mar en 254 lugares. En Cuba, en particular, se han registrado seis *tsunamis* y hay 11 lugares impactados por este tipo de eventos.

En los análisis de los perfiles sísmicos y en otros estudios submarinos que incluyen el territorio del talud insular, se han detectado evidencias de diferentes tipos de deslizamientos submarinos (desprendimientos, deslizamientos traslacionales, etcétera). Estos deslizamientos, aunque no han sido estudiados, pueden haberse desencadenado debido a eventos geotectónicos, como terremotos.

La probabilidad de que en Cuba ocurran terremotos de magnitud tal que generen un *tsunami* es casi nula, sin embargo, estudios en la

década de los años noventa demostraron que un terremoto de poca magnitud puede ocasionar un deslizamiento de tierra y éste, a su vez, probar un *tsunami*, por lo que para las condiciones cubanas, terremotos de mediana magnitud pueden provocar un deslizamiento de tierra y, en consecuencia, un *tsunami*; todo depende de las características geotectónicas del lugar y sus fallas (Castellanos-Abella y Pérez-Pérez, 2004; Castellanos *et al.*, 2006).

Los deslizamientos de tierra que generan *tsunamis* se dividen en submarinos y subaéreos. En el primero se divisa desde el área de generación una disminución del nivel medio del mar (nmm) y, en el segundo, se va formando una cresta hasta llegar a su máxima altura en el momento en que la masa que falla llega a su fin.

No existe en Cuba experiencia en el estudio de los deslizamientos submarinos, al contrario de los deslizamientos subaéreos, aunque no

referidos a la producción de *tsunamis*, sino a deslizamientos en tierra firme. No existen tampoco estudios precedentes de generación de oleaje (*tsunamis*) por deslizamientos en el territorio nacional.

Casos de estudio

En el primer estudio se analiza el caso hipotético de un deslizamiento submarino en la plataforma insular al sur de la bahía de Cienfuegos (figuras 1 y 2). Se hace la correspondiente propagación de la ola hacia la entrada de la bahía y de forma recta con respecto al deslizamiento, coincidiendo la costa de la zona de Playa Girón, provincia de Matanzas. Con respecto a la bahía, se estudian los efectos que ocasiona el fenómeno dentro de ella; en el caso de la línea de costa, se analiza la trepada que pudiera ocurrir y, por tanto, la zona de inundación. Se seleccionó como sitio de prueba por tener un pendiente larga y abrupta, que yace hacia la costa de Cuba a una distancia relativamente corta. También se encuentra en las cercanías de una de las bahías más importantes del país.

El segundo caso de estudio se ubicó al sur de la Sierra Maestra. En una zona de elevación en las inmediaciones de la costa denominada Dilán se ubicó el hipotético deslizamiento subaéreo (figura 3). Al pie de la superficie de falla se encuentra una carretera que comunica el lugar con Santiago de Cuba. En esta carretera ha habido reportes de deslizamientos procedentes de la zona en cuestión.

En ambos casos de estudio se hizo un perfil batimétrico (figura 4a, b y c).

Resultados

Caso de estudio. Deslizamiento submarino al sur de la bahía de Cienfuegos

Se asumió una longitud del deslizamiento alrededor de la pendiente (b) de 5 200 metros. A partir de este dato y considerando la superficie de falla como un arco parabólico, se calculan las demás características de la masa de fallo. La densidad del bloque de falla es de (γ_b) = 1 937 kg/m³ y la densidad del agua de mar (γ_w) es de 1 025 kg/m³.

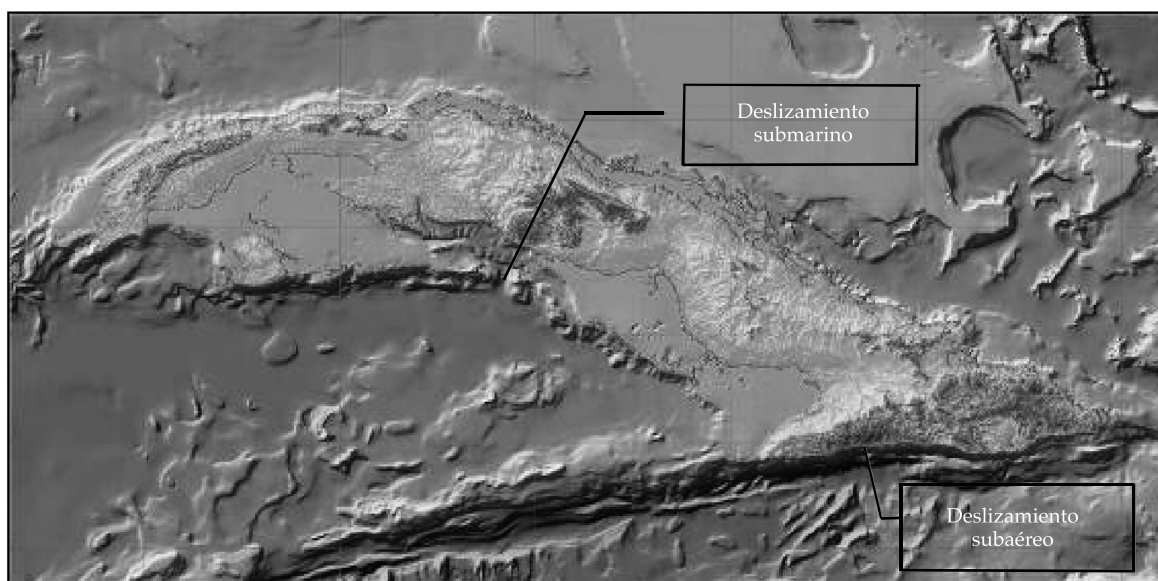


Figura 1. Casos de estudio.

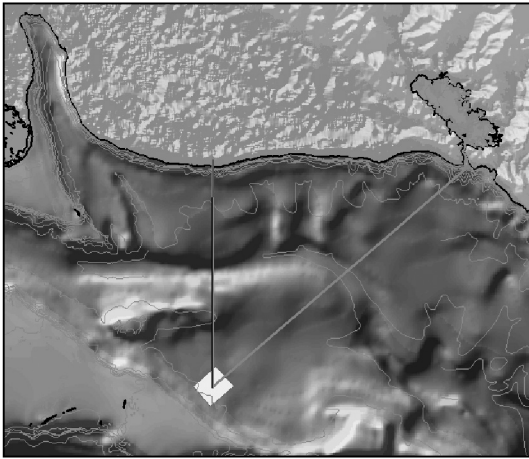


Figura 2. Localización del deslizamiento al sur de la bahía de Cienfuegos. Línea recta hacia la costa cercana a Playa Girón. Línea inclinada, hacia la entrada de la Bahía de Cienfuegos.

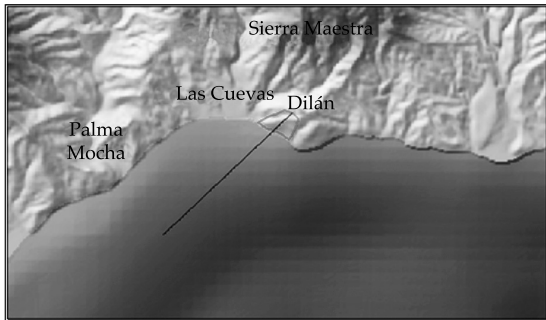


Figura 3. Ubicación del deslizamiento sub aéreo.

Las características del suelo de falla indican que es un suelo cohesivo; por tanto, el espesor del deslizamiento (T) es de 520 metros y su ancho (w) es de 1 300 metros. A continuación se presentan las fórmulas para su cálculo:

$$T \approx 0.10b \quad (1)$$

$$w \approx 0.25b \quad (2)$$

Al considerar la superficie de falla como un arco parabólico (Watts *et al.*, 2005), el radio (R) de esta superficie es de 6 500 metros. La sumergencia inicial, o sea, la profundidad

a la que está el centro geométrico del bloque (h_{0c}) con respecto al nmm es de 1 010 metros. El ángulo de la pendiente (θ) es de 5.59° (ver figura 5):

$$R = \frac{b^2}{8T} \quad (3)$$

Se encontró la longitud característica del movimiento (S_0) (Watts *et al.*, 2005), siendo 1 560 metros para un desplazamiento angular ($\Delta\Phi$) de 0.48 radianes (30.56°):

$$2S_0 = R * \Delta\Phi \quad (4)$$

$$S_u \approx 0.19(\gamma_b - \gamma_0)Tg \quad (5)$$

$$\Delta\Phi = \frac{8S_u}{\pi(\gamma_b - \gamma_0)Tg} \quad (6)$$

El final del recorrido será según se muestra en el perfil batimétrico, recorriendo una distancia de 59 390 metros (59.39 km) en el caso del perfil hasta la entrada de la bahía y de 38 260 metros (38.26 km) en el caso del perfil perpendicular hacia la línea de costa.

La amplitud inicial de la ola se puede determinar mediante gráficos y fórmulas. A continuación se presentan los resultados aplicando el método gráfico desarrollado por Najafi-Jilani y Ataie-Ashtiani (2009), y las fórmulas propuestas por Watts *et al.* (2005), que sólo son aplicables para pendientes menores o iguales a 30° , además de otras dos presentadas por el mismo autor en el año 2000, teniendo en cuenta el efecto de 2D y 3D, respectivamente. Siendo $h_{0c} = 1\ 010$ metros; $h_{0c}/b = 0.19$; $T/b = 0.10$; $S_0 = 1\ 560$ metros; el ángulo de inclinación de la pendiente θ será aproximado a 5° debido a que los gráficos no dan un rango, sino un ángulo exacto en específico, lo que introduce errores en la estimación.

Según el gráfico (figura 6), para ángulo $\theta = 5^\circ$; $a_0/S_0 = E^{0.0028}$, por tanto, $a_0 \approx 1.020$ metros, este valor no es del todo confiable, pues pueden existir errores tanto de medición en la escala

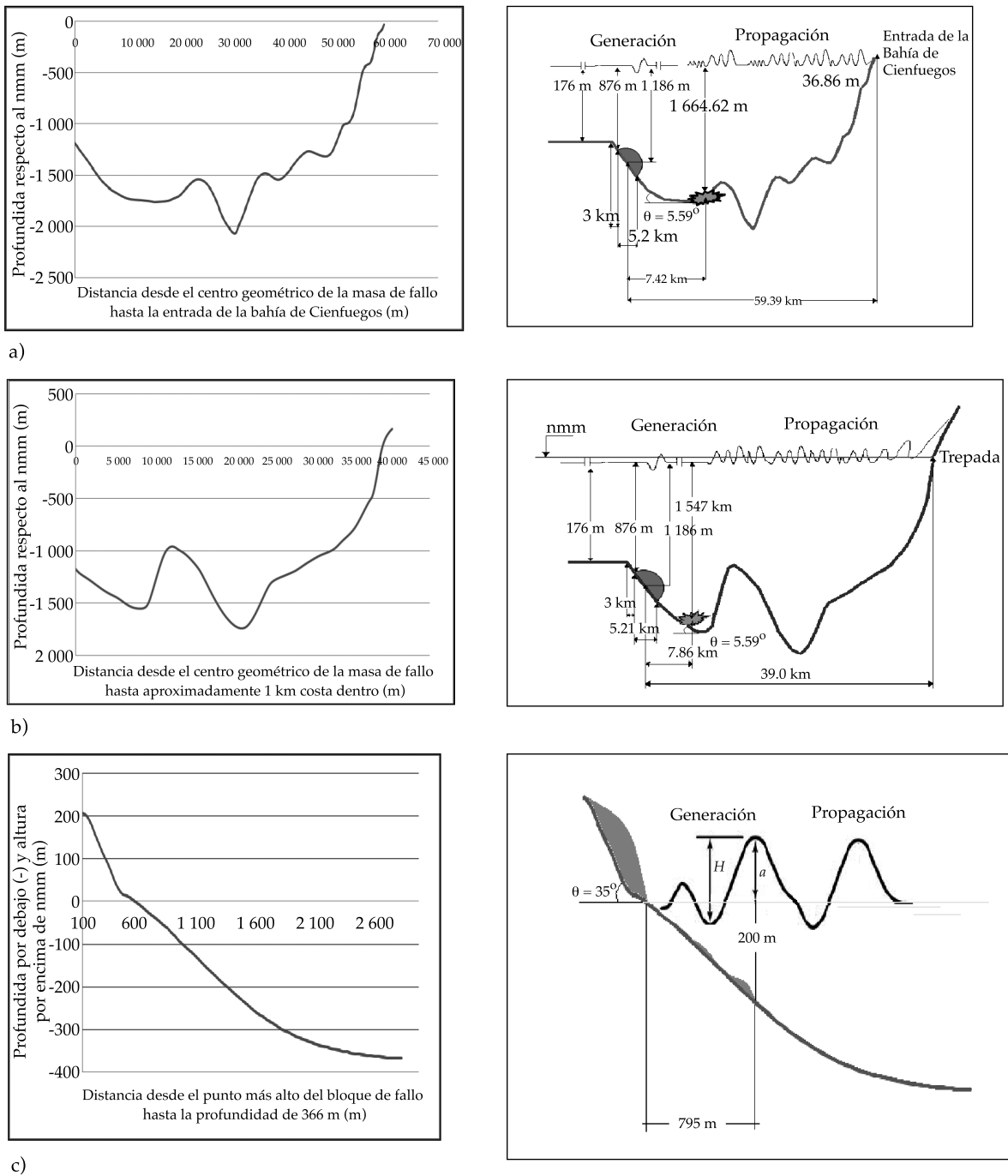


Figura 4. Perfil y esquema del deslizamiento; a) submarino hacia la bahía de Cienfuegos; b) submarino recto hasta la línea de costa (Playa Girón); c) subaéreo, Dilan.

del gráfico como errores al aproximar el ángulo a 5° .

Aplicando las fórmulas propuestas por Watts et al. (2005), que a continuación se presentan:

$$a_0 = S_0 (0.0574 - 0.0431 \text{sen} \phi) (T/b) \left(\frac{b \text{sen} \phi}{h_{0c}} \right)^{1.25} (1 - e^{-2.2(\gamma_b - 1)}) \quad (7)$$

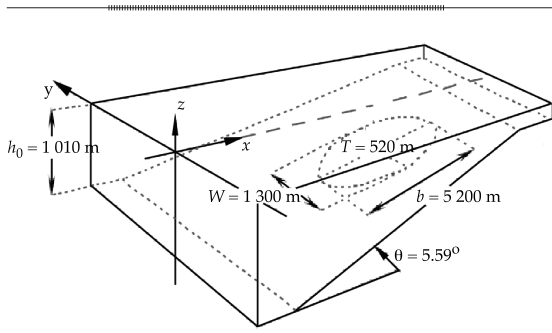


Figura 5. Características de la masa de fallo.

$$a_{2D} \cong 0.2139T \left(1 - 0.7458 \sin \theta + 0.1704 \sin^2 \theta \right) \left(\frac{b \sin \theta}{h_{0c}} \right)^{1.25} \quad (8)$$

$$a_{3D} \cong 0.2139T \left(1 - 0.7458 \sin \theta + 0.1704 \sin^2 \theta \right) \left(\frac{b \sin \theta}{h_{0c}} \right)^{1.25} \left(\frac{w}{w + \lambda_0} \right) \quad (9)$$

Los resultados obtenidos aplicando las expresiones anteriores son para las ecuaciones

(7), (8) y (9), y son 3.57, 43.5 y 1.90 metros. Otra característica importante de la onda es su amplitud, la cual se calcula mediante la siguiente expresión (Watts et al., 2005):

$$\lambda_0 \cong 3.87 \sqrt{\frac{bh_{0c}}{\sin \theta}} = 3.87 \sqrt{\frac{5200 \text{ m} \cdot 1010 \text{ m}}{\sin 5.59}} = 28416.68 \text{ m} \rightarrow 28.42 \text{ km} \quad (10)$$

Se concluye que la amplitud inicial a_0 está en el orden de $1 \sim 4$ m y se tomó valor intermedio de 2.0 m. El valor de la amplitud en 2D se alejó de la realidad quizás porque el ancho (w) es mucho menor que el doble de la longitud en el sentido del deslizamiento alrededor de la pendiente (b) y se ha demostrado que cuando esto ocurre, los modelos en 2D no dan resultados satisfactorios.

La altura inicial de la ola (H_0) se consideró igual a la amplitud inicial (a_0) = 2.0 metros, siendo en este caso a la altura de la cresta, debido a que se asumió por parte de los investigadores del tema que la altura de la cresta es la misma que la del valle.

Los resultados obtenidos en este caso de estudio se compararon con tres casos reales,

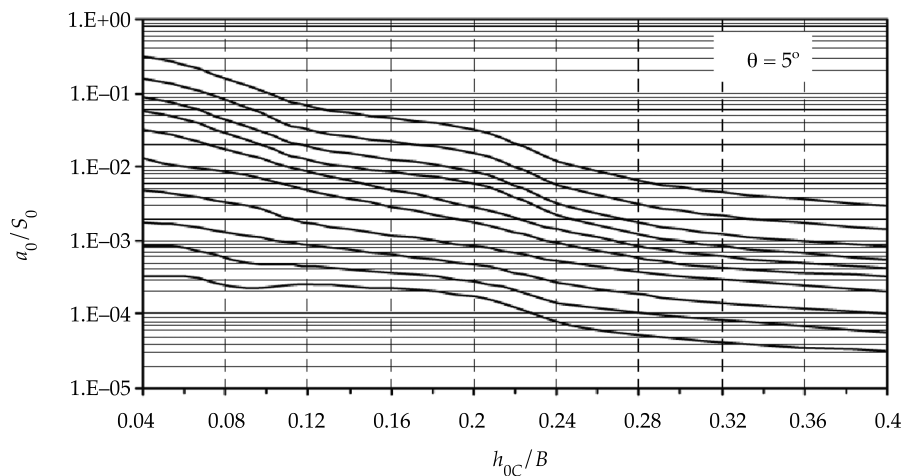


Figura 6. Gráficos adimensionales para la predicción de la amplitud (Najafi-Jilani y Ataie-Ashtiani (2009). Las curvas interiores corresponden a valores de $T/b = 1, 0.75, 0.5, 0.2, 0.15, 0.1, 0.05, 0.025, 0.0125$ y 0.00625 de arriba hacia abajo, respectivamente.

cuyos datos los brinda Najafi-Jilani y Ataie-Ashtiani (2009), como se muestra en el cuadro 1, con el objetivo de validar las expresiones utilizadas para las condiciones de esta investigación.

A partir del análisis del cuadro 1, se concluye que el deslizamiento del caso de estudio se acercó al ocurrido por sus características geométricas y de sumergencia inicial al de 1994 en Unimak, Alaska. Existieron diferencias en cuanto al ángulo de la pendiente, pero aquí es donde al comparar su amplitud inicial con la del caso de estudio su valor es menor. Sin embargo, en el caso de Unimak, Alaska, en 1946 en el mismo lugar, pero con un ángulo de pendiente muy similar al del estudio, resultó una amplitud inicial comparable con el caso de estudio tratado en este trabajo.

Comportamiento de otras características de la ola

Tener una caracterización completa de la onda inicial es importante, los valores de celeridad y periodo constituyen información necesaria para estudios de pronósticos. En la figura 7 propuesta por Watts *et al.* (2005) se pueden obtener las variables siguientes: periodo (T) = 300 segundos (5 min); celeridad (C) = 341 km/h; velocidad de grupo (u) = 99 km/h.

De las anteriores características, el periodo es el que más estuvo en el límite de la ocurrencia de un *tsunami* (12 horas-5 minutos).

Propagación hacia la línea de costa (Playa Girón)

La propagación se realizó en primera aproximación mediante la teoría lineal del

oleaje, teniendo una notable influencia el efecto de fondo. La ola rompe a una profundidad (h_r) de cinco metros, con un índice de rompiente (γ) de 0.85, con una altura (H_r) de 4.28 metros, una longitud de onda (λ) de 279 metros y una celeridad (C) de 0.93 m/s. La pendiente de la playa se calculó dando como resultado 20° . Para validar la aplicación de la teoría línea del oleaje como primera aproximación, se analizan estadísticamente los resultados de la modelación física de estos fenómenos, realizado por Grüne *et al.* (2007). Se concluyó que existía una relación entre la altura de ola generada (H_g) y la máxima altura de trepada vertical (R), y entre la altura de rompiente (H_r) y R , para una pendiente de playa de 24° . Se presentaron los resultados en la figura 8.

Para las condiciones del caso de estudio, la máxima altura de trepada vertical (R) estuvo en el orden de 4 a 7 m. Se tomó para estar en el lado de la seguridad una R de 7 m; para estas condiciones se presentó la zona de inundación (figura 9). La zona costera en la zona de la bahía de Cochinos es baja, y uno de los ecosistemas más importantes de Cuba; un evento de este tipo podría producir afectaciones severas al medio natural.

Propagación hacia la bahía de Cienfuegos

La bahía de Cienfuegos tiene un ancho de $B = 4.3$ km, una longitud de $L_b = 17.7$ km y una profundidad media de 10 metros; el canal de entrada tiene una longitud de $L_c = 3.8$ km y un ancho $b = 1.02$ km en su parte más larga y ancha, respectivamente (figura 10). La propagación se hizo siguiendo la teoría lineal del oleaje hasta la entrada del canal de la bahía.

Cuadro 1. Comparación del caso de estudio con casos reales.

Lugar	T/B	h_r/B	θ ($^\circ$)	a_0 (m)
1946, Unimak, Alaska	0.0075	0.04	4.3	4.3
1994, Skagway, Alaska	0.069	0.442	22	22
1994, Unimak, Alaska	0.111	0.133	26	26
Caso de estudio	0.10	0.19	5.59	2.0

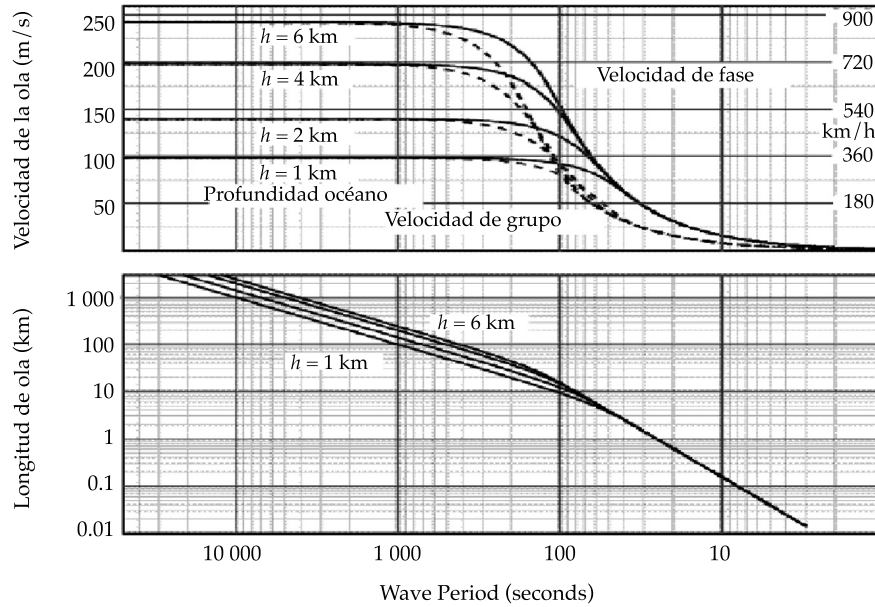


Figura 7. (Figura superior); velocidad de fase $c(w)$ (líneas sólidas), y u de velocidad de grupo (líneas discontinuas) de olas de tsunami en océanos de 1, 2, 4 y 6 km de profundidad. (Figura inferior) longitud de onda asociada con cada periodo de ola. En general, el tsunami tiene longitudes de onda más grandes que 3 h.

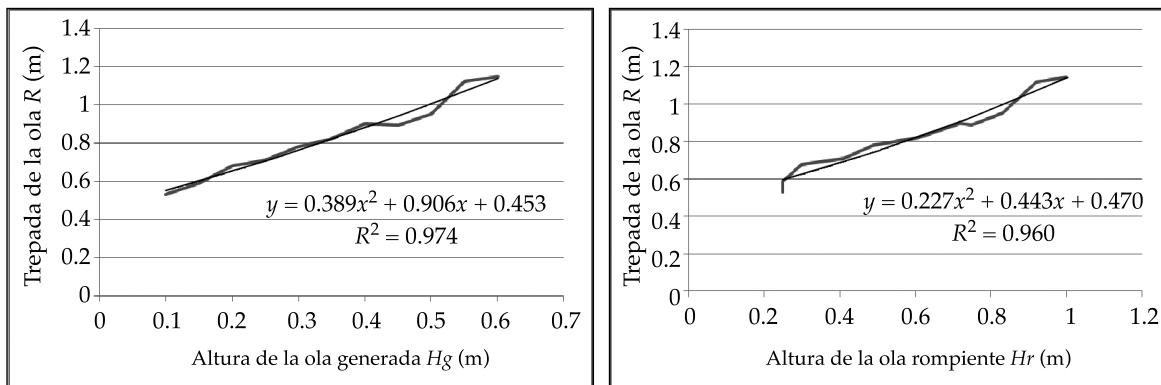


Figura 8. Resultados del procesamiento estadístico de la investigación del FZK, 2007.

A la entrada del canal de la bahía se presenta una altura de ola de 4.27 m, la cual varía su altura a medida que penetra en la ensenada por el llamado efecto de la bahía, que vincula profundidad y ancho. La longitud de onda (λ) entrante estuvo en el orden de 2 059 metros, con una celeridad $C = 7$ m/s.

El efecto de la bahía se realiza aplicando la Ley de Green, que se expresa a través de la siguiente fórmula:

$$\frac{H_x}{H_0} = 2 \sqrt{\frac{b_0}{b_x}} \sqrt[4]{\frac{h_0}{h_x}} \quad (11)$$

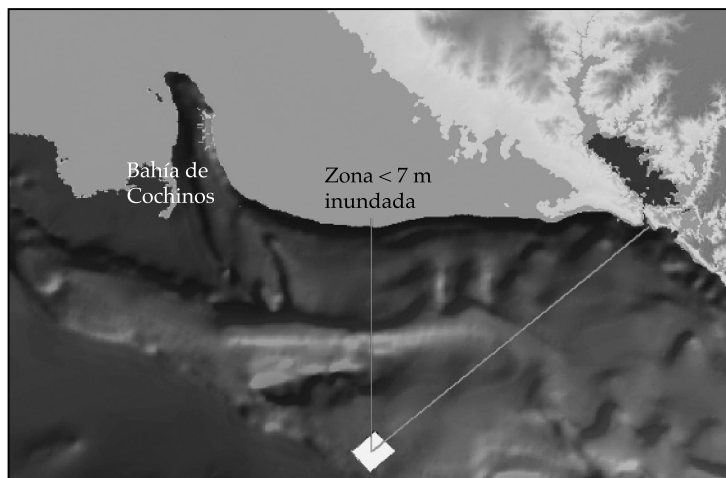


Figura 9. Zona inundada por la trepada de la ola en el tramo desde Cienfuegos hasta bahía de Cochinos.

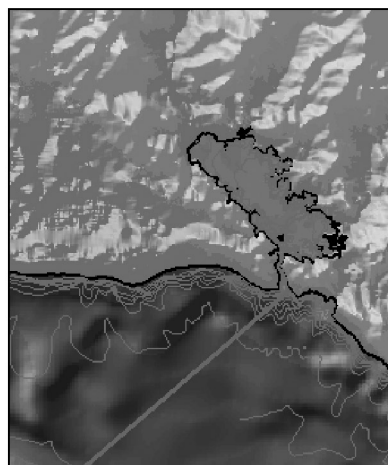
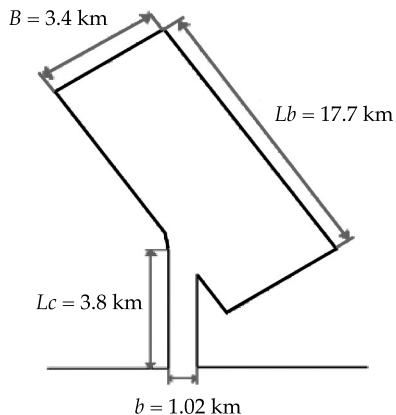


Figura 10. Esquema de la bahía.

Donde H es la altura de ola (m); b , el ancho de la bahía (m); h , la profundidad del agua; el subíndice 0 significa cerca de la costa; y el valor de x , distancia en tierra (m). Por lo tanto, la altura de ola en x aumenta con reducir el ancho de la bahía y reducir la profundidad del agua. La Ley de Green no asume ninguna pérdida de energía, ninguna reflexión y alturas de ola pequeñas; se ubicaron ocho puntos, cuatro a lo largo del canal de entrada y los restantes a lo largo de la bahía, y se midió en cada uno profundidad y ancho. Los resultados

se muestran en el cuadro 2 y la ubicación de los puntos en la figura 11.

El perfil se trazó recto hacia la refinería de petróleo de la ciudad de Cienfuegos, por lo que la última altura (punto 8) coincide con este importante objetivo económico (figura 12).

Como se puede observar en la figura 12, los efectos de un tsunami debido a un deslizamiento como el simulado podrían afectar una amplia zona de la bahía de Cienfuegos, producto de severas inundaciones, y dañar de forma sensible la refinería de petróleo.

Cuadro 2. Efecto de la bahía en la altura de ola.

Tramo	Ubicación	Ancho (m)	Profundidad (m)	$H(x)$ (m)	$H(o)$ (m)	$b(o)$ (m)	$b(x)$ (m)	$h(o)$ (m)	$h(x)$ (m)	Trepada (m)
1	Entrada del canal	1 000	31.64	4.9	4.27	1 000	720	31.64	34	11.5
2	Interior del canal	720	34	7.5	4.9	720	313	34	32	18.8
3	Interior del canal	313	32	7.1	7.5	313	357	32	31	17.6
4	Salida del canal	357	31	2.2	7.1	357	6 450	31	11.09	5.2
5	Entrada de la bahía	6 450	11.09	2.7	2.2	6 450	4 050	11.09	12.03	6.7
6	Interior de la bahía	4 050	12.03	2.2	2.7	4 050	6 310	12.03	10.68	5.5
7	Interior de la bahía	6 310	10.68	2.7	2.2	6 310	5 840	10.68	5.4	7.6
8	Refinería	5 480	5.4	2.7						

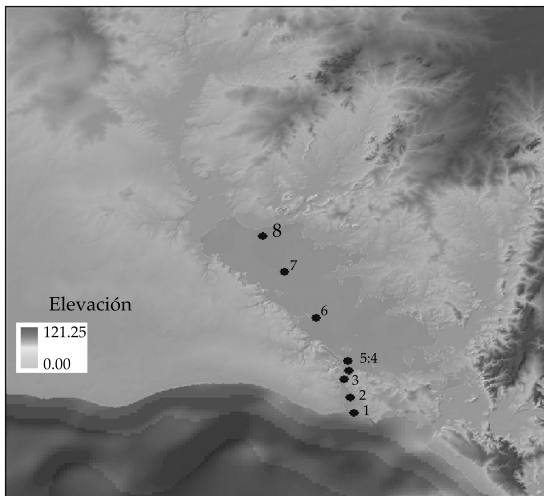


Figura 11. Modelo digital de elevación, incluyendo batimetría con sombreado de la bahía de Cienfuegos y sus alrededores. Los puntos se corresponden con el cuadro 2.

Caso de estudio. Deslizamiento subaéreo Dilan, sur de la Sierra Maestra

Al sur de la Sierra Maestra, en la provincia de Granma, específicamente en una zona de elevación en las inmediaciones de la costa

denominada Dilan, se ubica el hipotético deslizamiento subaéreo (ver figura 13). Al pie de la superficie de falla hay una carretera que comunica Santiago de Cuba con la provincia de Granma. En esta carretera se han reportado deslizamientos en diferentes secciones. Se hizo un perfil batimétrico desde la masa de fallo hasta una profundidad aproximada de 367 metros (ver figura 14). En este caso, la ola se propagará hacia el mar de forma radial al origen y la trepada será de forma fundamental en la parte oeste de la masa de fallo.

El espesor del deslizamiento (s) fue asumido de 110 metros; la longitud en el sentido de la falla (L) se tomó de 426 metros; el ancho (w) fue de 533 metros, y la densidad (γ_b), de 2 447 kg/m³. El ángulo de la pendiente (θ) es de 35°. Se asume que la masa de fallo penetró en el mar hasta la profundidad de 200 metros, recorriendo una distancia aproximada de 795 metros, aunque pudiera ser un poco más o menos debido a que los sedimentos rocosos se van expandiendo en el fondo. La velocidad del deslizamiento (v_s) es otro de los parámetros que se asumió en el orden de los 85 m/s.

Al entrar la masa en contacto con el agua se produce una mezcla entre agua, aire y tierra;

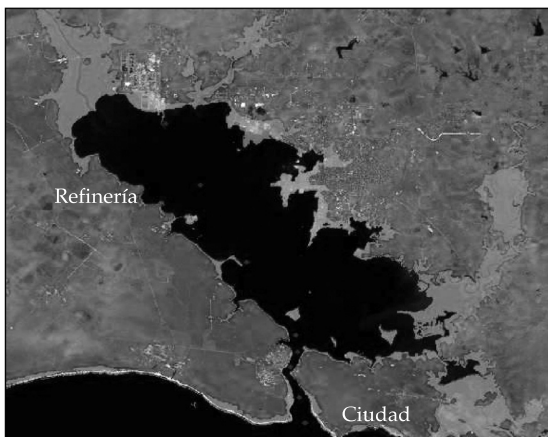


Figura 12. Zona inundada (gris claro) de la bahía de Cienfuegos. Composición a color RGB (1, 2, 3). Puntos con la estimación de la altura de ola según cuadro 2.

gobernada por el número adimensional Froude, se tiene que $F = 1.918$, según Slingerland y Voight (1979). Los más relevantes eventos de deslizamientos producen olas cuando el número de Froude está en el intervalo de $0.5 < F < 4$. Para el caso de estudio, el valor es de 1.91, según la ecuación (12), tomado velocidad de 85 m/s y profundidad de 200 metros:

$$F = \frac{v_s}{\sqrt{gh}} \quad (12)$$

Como $F < [(5/3) + (1/2)*S]$, donde S es el ancho relativo al deslizamiento definido por $S = \frac{s}{h}$, siendo s el espesor de la falla del cierre; esto es, la forma en que la ola que se formó impacta la parte que quedó de la pendiente de la costa después de haberse producido el deslizamiento resultó ser un flujo no separado, aumentando el deslizamiento durante la penetración.

La ola se clasificó de acuerdo con F y S como de transición no lineal $(4-8S) < F < (6.6-8S)$. Al penetrar la masa de tierra en el agua, se forma la primera cresta, la cual debe ir ganando en altura hasta que la masa de tierra se detiene, comenzando entonces a propagarse de forma radial a lo largo del océano abierto.

Los cálculos de la primera cresta se realizaron mediante las fórmulas de Fritz et al. (2009), modelo de deslizamiento granular, obteniéndose un valor de a_c igual a 77.08 metros:

$$\frac{a_c}{h} = 0.25 \left(\frac{v_s}{\sqrt{gh}} \right)^{1.4} \left(\frac{s}{h} \right)^{0.8} \quad (13)$$

Según Noda (1970), que aplica un modelo de pistón, el valor de la altura de la primera cresta es de 656.5 metros:

$$\frac{a_c}{h} = 1.32 \left(\frac{v_s}{\sqrt{gh}} \right) \quad (14)$$

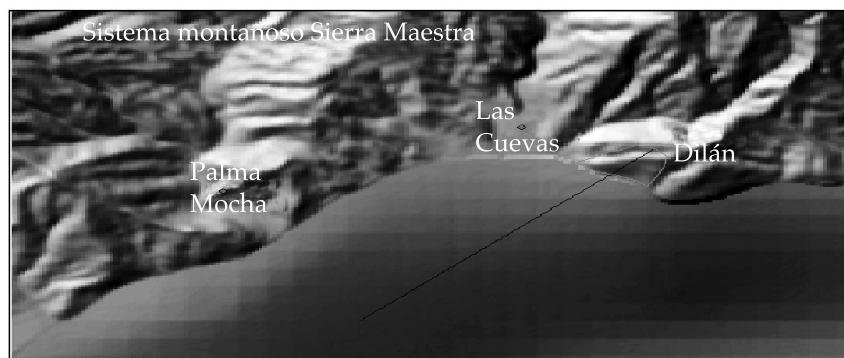


Figura 13. Ubicación del deslizamiento subaéreo.

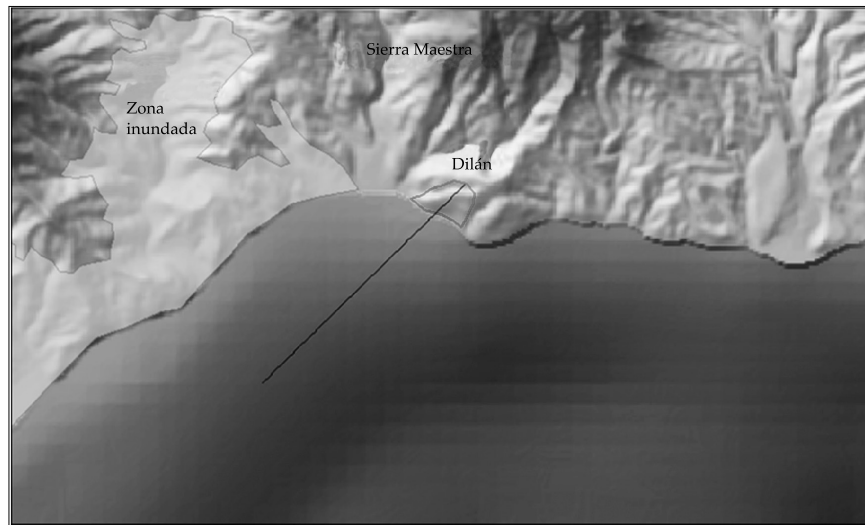


Figura 14. Zona inundada por la trepada vertical de la ola.

Se toma como la máxima amplitud de la cresta 77.08 m, pues es la formulación más recomendada, y sus valores son los más cercanos a las mediciones realizadas en prototipo, como es el caso del deslizamiento ocurrido en la bahía de Lituya (Fritz *et al.*, 2009).

Altura de la ola generada por el deslizamiento

Según Huber y Hager (1997), aplicando un modelo de deslizamiento granular (ecuación (15)), el valor de la altura de ola generada sería de 107 metros:

$$H = 0.88 \sin \theta \left(\frac{\delta_b}{\delta_w} \right)^{1/4} * \left(\frac{V_s}{L_s} \right)^{1/2} * \left(\frac{h}{x} \right)^{1/4} \quad (15)$$

De acuerdo con el modelo de Kamphuis y Bowering (1970), modelo de bandeja, bloque / peso, la altura obtenida sería de 153.34 metros:

$$\frac{H}{h} = \left(\frac{v_s}{\sqrt{gh}} \right)^{0.7} \left[0.31 + 0.21 \log \left(\frac{L_s}{h^2} \right) \right] + 0.35 * e^{-0.08(x/h)} \quad (16)$$

Se toma como altura $H = 153.34$ metros, ya que se asume que la masa del deslizamiento es en forma de ortoedro, para poder encontrar sin complicación su volumen. La celeridad de la ola es de 187.63 m/s y se obtiene a través de la siguiente fórmula, donde H es 153.34 metros y h es igual a 200.56 metros.

$$C = \sqrt{g * (H + h)} \quad (17)$$

y la longitud de onda es igual 1.5 kilómetros, aplicando la siguiente relación $\lambda = 7.6 * h$; el periodo de la ola es 29.21 segundos de acuerdo con $T = \frac{\lambda}{C}$.

Predicción de la máxima trepada de la ola

Como la longitud de onda es tan grande y el movimiento de la onda se ejecuta de forma radial a la generación, la mayor probabilidad de trepada es a lo largo de la parte oeste de la masa de fallo; la primera cresta impactará la costa después de haberse generado por completo (después de que la masa que se

desliza finaliza su recorrido dentro del mar) con un $R = 456$ m, aproximadamente, a lo largo de la mitad de la longitud de onda, 750 metros. Se debe aclarar que este impacto sería en los puntos en que la onda pueda tocar la costa; en los que la onda no choque contra la línea de costa, sólo se irá desplazando a mar abierto hasta llegar con una altura determinada a las costas de Jamaica o disiparse antes de llegar. Hall y Watts (1953) plantean la ecuación (18), que se presenta a continuación, para el cálculo de la trepada, siendo el valor de 456.0 metros:

$$\frac{R}{h} = 3.1 \left(\frac{H}{h} \right)^{1.15} \quad (18)$$

La figura 14 muestra el alcance de la ola para la simulación dada, aunque en realidad esta simulación debe hacerse considerando la penetración del flujo de agua en la topografía con la energía de la misma; sin embargo, permite tener una idea preliminar de los daños que causaría un desastre de este tipo en esa localidad y sirve como caso de estudio para realizar análisis similares en otras localidades de las costas de Cuba.

El perfil de la onda solitaria —representado por la ecuación (19) y mostrada en la figura 15—, fórmula que se presenta para ondas solitarias, se observó de la siguiente forma:

$$\eta(x) = H * \sec^2 \left(\sqrt{0.75 * H / h} * x / h \right) \quad (19)$$

La figura 15 permite tener una idea de la masa de agua que se traslada como una onda solitaria, con una amplitud de cresta de 77.00 metros.

Se realiza una comparación con un caso real ocurrido el 10 de julio de 1958 en la bahía de Lituya, al sur de la costa de Alaska (Fritz et al., 2009). Los valores pueden observarse en el cuadro 3. Los valores obtenidos para el caso de estudio tratado en este trabajo son menores, excepto para la altura de ola H y el tiempo de

deslizamiento T . Se concluye que los resultados del caso de estudio se acercan a los estimados realmente en un caso de deslizamiento subaéreo muy estudiado por otros investigadores.

Conclusiones

No existe en Cuba experiencia en el estudio de los deslizamientos submarinos; es necesario llevar a cabo estudios profundos de este fenómeno y su vinculación con la generación de *tsunamis*.

En cuanto a los deslizamientos subaéreos, la principal característica es la sumergencia inicial y, en el caso de los subaéreos, la velocidad de caída de la masa de fallo, teniendo como parámetros semejantes, características de la masa y el ángulo de falla.

Pudiera asumirse como índice de rompiente para estos casos de *tsunamis* el valor de $\gamma = 0.78$ como primera aproximación.

En el caso del oleaje provocado por el deslizamiento submarino propagado hacia la bahía de Cienfuegos, la zona del canal de entrada donde los puntos 2 y 3 alcanzan alturas de olas mayores de siete metros afecta a ambos lados del canal, sobre todo en el primer tramo. Dentro de la bahía, la costa occidental se observa poco afectada, con excepción de dos espigones que fueron cubiertos por completo. Las zonas bajas de los tres ríos principales que

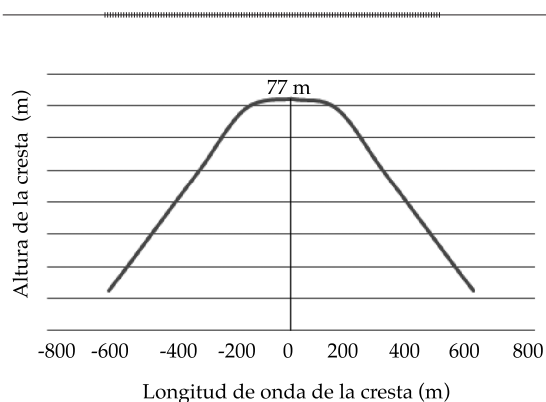


Figura 15. Perfil de la onda solitaria.

Cuadro 3. Comparación de los resultados obtenidos con un caso real.

Lugar	L_s (m)	s (m)	W (m)	v_s (m/s)	θ (°)	h (m)	a_c (m)	H (m)	R (m)	C (m/s)	λ (m)	T (s)
Bahía Lituya	970	120	823	110	45	122	152	162	530	-	-	16
Caso de estudio	426	110	533	85	35	200	77	153	456	52.19	1 524	29

drenan hacia la bahía también fueron estimadas con serias inundaciones por el oleaje.

Para el oleaje provocado por el deslizamiento submarino propagado hacia la línea de costa, la trepada de la ola $R = 7$ m. Se concluye que gran parte de Playa Girón y las localidades cercanas se verían afectadas en caso de que este tipo de evento ocurra en una zona con estas características.

En deslizamiento subáereo se tiene una altura de trepada de 456 metros, inundando una extensa zona de la parte sur de la Sierra Maestra.

Referencias

- CASTELLANOS-ABELLA, E.A. y PÉREZ-PÉREZ, C.M. *Proyecto evaluación geólogo-geomorfológica de la amenaza de deslizamientos de terreno para las condiciones de Cuba. Reporte técnico de la etapa I: Definiciones, conceptos, clasificaciones y métodos de evaluación.* La Habana: Instituto de Geología y Paleontología, MINBAS, junio de 2004.
- CASTELLANOS-ABELLA, E.A., CABRERA, M. y GONZÁLEZ, B. *Deslizamientos submarinos en el talud insular como posibles generadores de tsunamis reportados en Cuba (póster).* MarCuba 2006, VII Congreso de Ciencias del Mar, La Habana, Cuba, 2006.
- FRITZ, M.H., MOHAMMED, F., and YOO, Y. *Lituya Bay Landslide Impact Generated Mega-Tsunami 50th Anniversary. Pure and Applied Geophysics.* Basel: Birkhauser Verlag, 2009.
- GRÜNE, J., SCHMIDT-KOPPENHAGEN, R., and OUMERACI, H. Coastal Research Centre FZK. Joint Institution of University Hannover and Technical University Braunschweig. Technician report. Hanover, Germany, April 2007.
- HALL, J.V.Jr. and WATTS, G.M. *Laboratory investigation of the vertical rise of solitary waves on impermeable slopes.* Tech. Memo 33. U.S. Army Corps of Engineers, Beach Erosion Board, 1953.
- HUBER, A. and HAGER, W.H. *Forecasting impulse waves in reservoirs.* Dix-neuvième Congrès des Grands Barrages C31:993-1005. Florence, Italy, Commission International des Grands Barrages, Paris, 1997.
- KAMPHUIS, J.W. and BOWERING, R.J. Impulse waves generated by landslides. In *Proc. 12th Coastal Engin. Conf. ASCE 1*, 1970, pp. 575-588.
- NAJAFI-JILANI, A., ATAIE-ASHTIANI, B. Estimation of near-field characteristics of tsunami generation. *Ocean Engineering.* Available online, January 9, 2009, *World Wide Web:* www.elsevier.com/locate/oceaneng.
- NODA, E. Water waves generated by landslides. *J. Waterw. Harbors Coastal Eng. Div. ASCE.* Vol. 96 (WW4), 1970, pp. 835-855.
- SLINGERLAND, R.L. and VOIGHT, B. Occurrences, properties and predictive models of landslide-generated impulse waves. *Rockslides and Avalanches.* Vol. 2. Ed. Voight, B, *Developments in Geotechnical Engin.* 14B, Elsevier, Amsterdam, 1979 pp. 317-397.
- WATTS, P., GRILLI, S.T., TAPPIN, D.R., and FRYER, G.J. Tsunami generation by submarine mass failure. II: Predictive equations and case studies. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 2005, pp. 283-297.

Abstract

CÓRDOVA-LÓPEZ, L.F., SÁNCHEZ-CRUZ, Y. & CASTELLANO-ABELLA, E. *Simulation of tsunamis on the banks of the island of Cuba, generated by landslides*. Water Technology and Sciences (in Spanish). Vol. IV, No. 5, November-December, 2013, pp. 19-32.

While tsunamis are generally caused by earthquakes, it has been shown that around 30% of maximum tsunami crests are most likely related to land masses that have broken away (Watts et al., 2005). The present work developed three case studies to test possible submarine and subaerial landslides in different locations on the banks of the island of Cuba. Based on the parameters of these landslides, the resultant wave was generated and propagated to identify effects on the coastline. The results made it possible to define the height of the wave created, its behaviour throughout the profile, its rise and the effects inside a bay—necessary elements for calculating impact on coastal zones.

Keywords: aerial landslides, flood, submarine landslides, tsunami, wave.

Dirección institucional de los autores

Dr. Luis Fermín Córdova López

Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (CUJAE)
Calle 114, núm. 11901. e/Ciclovía y Rotonda, Marianao
19390 Ciudad de La Habana, CUBA
Teléfono: +53 (7) 2663 466
Fax: +53 (7) 2602 013
cordova@tesla.cujae.edu.cu

Ing. Yoany Sánchez Cruz

Empresa Aguas de La Habana, Cuba
Calle Fomento esq. Recreo, Reparto Palatino, Cerro
Ciudad de La Habana, CUBA
Teléfono: +53 (7) 6434 950
Fax: +53 (7) 6424 961
ahabana.co.cu

Dr. Enrique Castellano Abella

Instituto de Geología y Paleontología
Vía Blanca núm. 1002 y Carretera Central San Miguel del
Padrón
11000 Ciudad de La Habana, CUBA
glenda@idict.cu
Teléfono: +53 (7) 6967 232
Fax: +53 (7) 6967 004
eacastellanos@gmail.com