

# *Utilización de Sistemas de Información Geográfica para la Mitigación de Eventos de Deslizamientos*

*Mairim Martínez Báez  
Maestría en Ciencia y Tecnología Geoespacial  
Ruth L. Trujillo Rodríguez  
Escuela Graduada  
Universidad Politécnica de Puerto Rico*

---

**Abstracto** — *Luego del paso del huracán María, todos los planes de mitigación de Puerto Rico se encuentran bajo revisión y el municipio de Guaynabo no es la excepción. La integración de Sistemas de Información Geográfica (SIG) resulta indispensable para la creación de proyectos de mitigación en los municipios, simplifica el análisis geográfico y la visualización gráfica de datos espaciales esenciales para la ubicación de eventos y proyectos futuros. Los deslizamientos identificados luego del huracán María representaron una cifra alarmante para la realidad geográfica de Puerto Rico. De ello, se creó un mapa de susceptibilidad a eventos de deslizamientos con datos de pendientes de elevación, tipos de suelo y eventos recurrentes en la zona sur del municipio de Guaynabo. El mapa creado es una herramienta importante para la ubicación de futuros proyectos de mitigación, inclusive para el municipio de Guaynabo.*

**Términos Clave** — *Deslizamiento, Municipio de Guaynabo, Plan de mitigación, Sistemas de Información Geográfica.*

## **INTRODUCCIÓN**

Tras el paso del huracán María en septiembre 2017, Puerto Rico experimentó alrededor de 40,000 casos de deslizamientos [1]. A causa de estos eventos, gran parte de las carreteras del país sufrieron daños, se mantuvieron inaccesibles y además de los daños reportados a viviendas. La gran magnitud del fenómeno, categoría 4 con características de un evento categoría 5, provocó que la mayoría de los planes de mitigación de los municipios no fueran 100% efectivos. Las áreas rurales fueron totalmente afectadas por eventos de deslizamiento, por lo que la zona sur del Municipio Autónomo de Guaynabo (MAG) no fuera la excepción.

Los efectos de este fenómeno atmosférico evidencian la necesidad de revisar constantemente los planes de mitigación, tanto a nivel estatal como municipal. En este proceso de revisión, es indispensable la integración de SIG, ya que utiliza un conjunto de herramientas y métodos para el análisis geográfico y la visualización gráfica de datos espaciales, tales como mapas, tablas o gráficas. Lo más sorprendente de los SIG es su utilización interdisciplinaria, desde análisis ambientales hasta sociales, y su conexión con el espacio, así como la planificación para la mitigación multirriesgo, entre estos los riesgos por deslizamientos.

### **Descripción de la investigación**

En este estudio se trabajará con el área sur del MAG, la cual ha sido identificada en estudios pasados como alta y moderadamente susceptible a deslizamientos. Además, se utilizó esta área, ya que en la misma se reportaron varios eventos de deslizamientos antes y después del paso del huracán María. El área sur de Guaynabo también tiene las elevaciones más altas del municipio, lo cual es una característica de zonas propensas a deslizamientos, haciendo de esta una obvia elección. Con los resultados obtenidos, se espera poder crear un mapa que ayude al MAG en la toma de decisiones, así como en la elaboración de futuros proyectos de mitigación.

La metodología utilizada consistió en la recopilación de datos y textos relevantes al tema de deslizamientos, uso de SIG en la elaboración de mapas y análisis, mitigación ante deslizamientos, así como investigaciones y proyectos realizados a base de este tema. También se recurrió a la recopilación de datos espaciales oficiales en formato *shapefile* como lo son tipos de suelos, uso de suelos, calles/caminos, cuerpos de agua, límites

de jurisdicción e imágenes aéreas ortorectificadas. En la investigación se identificaron áreas susceptibles a deslizamientos en el MAG, partiendo del tipo de suelo, recurrencia y otros datos, que influyen en la identificación de zonas susceptibles a deslizamientos. Con estos datos, se desarrolló un mapa identificando áreas susceptibles a deslizamientos en el área sur del MAG.

### Objetivos de la investigación

Los objetivos principales de esta investigación consisten en identificar aquellas áreas susceptibles a deslizamientos en el área sur del MAG con la utilización de SIG; comparar eventos de deslizamientos pasados con aquellos registrados durante el huracán María e identificar si estas áreas forman parte del Plan de Mitigación del Municipio; y crear una fuente de datos geográficos para una mejor toma de decisiones a la hora de enfrentar eventos de deslizamientos.

### Contribuciones de la investigación

La mayor contribución de este trabajo investigativo es compartir los resultados con el MAG, de modo que, puedan tomar en cuenta este análisis de datos en sus futuros planes de mitigación ante eventos de deslizamientos.

## REVISIÓN LITERARIA

### Contexto geográfico del área de estudio y términos de mitigación

El MAG se encuentra en la costa noreste de Puerto Rico. Es parte del área metropolitana de San Juan y tiene una extensión territorial de 27.6 millas cuadradas. Los municipios que colindan con Guaynabo son Cataño al noroeste; San Juan al este; Aguas Buenas al sur y Bayamón al oeste. El municipio está compuesto por diez barrios: Pueblo Viejo, Frailes, Santa Rosa, Pueblo, Camarones, Río, Guaraguao, Mamey, Hato Nuevo y Sonadora [2]. Existen tres componentes topográficos en el municipio de Guaynabo: llano costero al norte, humedales que se encuentran en la colindancia de Cataño y que forma parte de la Ciénaga de Las

Cucharillas, así como mogotes sensitivos a la erosión de lluvia y viento. Las elevaciones que se pueden encontrar al sur del municipio promedian entre 100 a 490 metros al nivel del mar, siendo el punto más alto el cerro La Marquesa con 510 metros de elevación [3]. Por tal razón, el área de estudio de este proyecto es la zona sur/centro de Guaynabo, zona que cuenta con las elevaciones más significativas del municipio y en dónde podrían surgir eventos de deslizamiento de tierra.

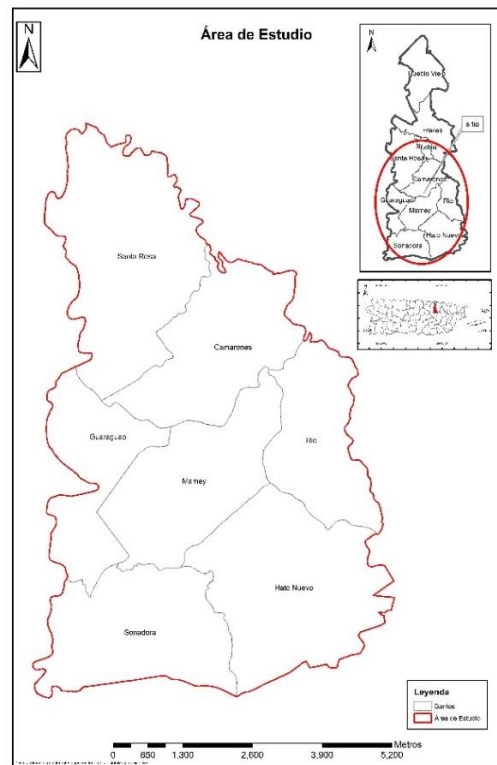


Figura 1

### Área de estudio y su localización dentro del Municipio Autónomo de Guaynabo

Entre los muchos planes que se elaboran en los gobiernos se encuentra el Plan de Mitigación de Riesgos, el cual tiene como propósito reducir el riesgo del entorno ante eventos naturales. Según Stitche [4], las etapas de la creación de un plan de mitigación son: análisis del riesgo (comprende la probabilidad, magnitud y distribución de este); evaluación de vulnerabilidad, presente y futura; capacidad de evaluación, tanto legal, política, institucional, fiscal y técnica; desarrollo de un plan,

el cual tenga metas, objetivos y políticas; adopción e implementación; y, por último, el monitoreo, evaluación y actualización del plan. El proceso de un plan de mitigación comienza con el compromiso de reducir la vulnerabilidad a riesgos naturales y el apoyo de un ente gubernamental, lo cual en la mayoría de los casos requiere de la educación y orientación de aquellos responsables de la toma de decisiones de una entidad o gobierno.

El Plan Federal de Mitigación Multi-Riesgo del municipio de Guaynabo, con vigencia del 2016, fue estudiado y analizado. En este plan se plantea que el municipio puede experimentar riesgos como inundaciones, huracanes o tormentas tropicales, marejadas ciclónicas, deslizamientos, terremotos, maremotos, fuego forestal, fuego urbano, sequía y erosión costera. Este proyecto analizará el plan desde el área de riesgos por deslizamiento. En el Capítulo 5 del Plan de Mitigación se discuten puntos importantes relacionados al tema de deslizamientos, como lo es la geografía física del municipio, topografía, geología, tipos de suelos, riesgos de deslizamientos e hidrografía. Se define *deslizamiento* como el movimiento repentino de materiales terrestres, que incluyen la caída de rocas y la erosión constante o la combinación de ambos [3]. Como dato base para identificar áreas susceptibles a deslizamientos se utilizó el mapa realizado por Monroe [5]. Este mapa fue realizado tras una investigación del *U.S. Geological Survey (USGS)*, en donde se identificaron todas aquellas áreas susceptibles a deslizamientos en Puerto Rico. El trabajo de Monroe es la base de todos los mapas de deslizamientos oficiales que se hacen en Puerto Rico. En ese trabajo se clasificó la susceptibilidad a deslizamientos en cuatro características: áreas de alta/mayor susceptibilidad, áreas de alta susceptibilidad, áreas de susceptibilidad moderada y áreas de baja susceptibilidad [5]. Las áreas con alta/mayores susceptibilidades dependen del material del suelo; las de alta susceptibilidad dependen de la elevación de la pendiente mayor de 50%; aquellas de susceptibilidad moderada puede ser considerada un área estable; y, por último, aquellas áreas de baja susceptibilidad son

identificadas como zonas planas o cerca de rocas estables [3].

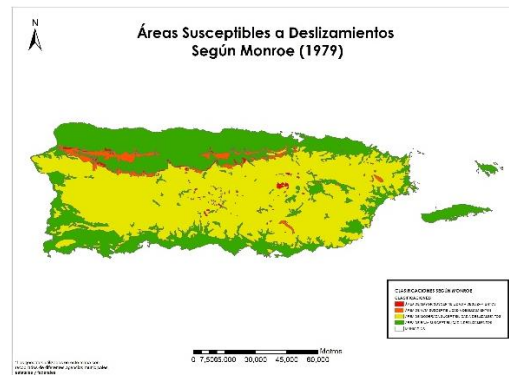


Figura 2

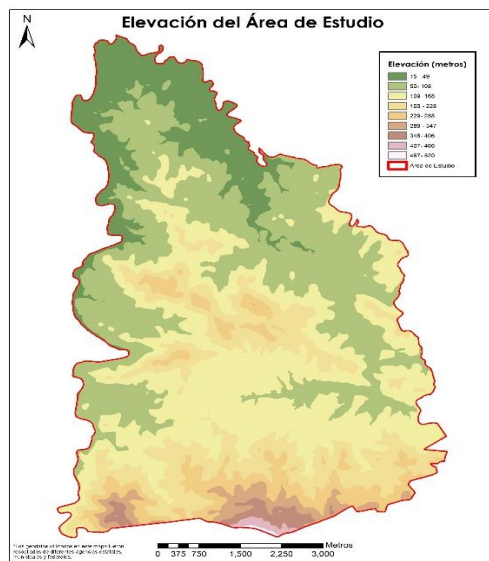
Áreas susceptibles según estudio realizado por Watson H. Monroe en 1979

### Trabajos realizados sobre mitigación, eventos de deslizamientos y utilización de Sistemas de Información Geográfica (SIG)

Un elemento importante de los planes de mitigación son los mapas, ya que son una representación de dos dimensiones de una realidad tridimensional. Por medio de una serie de capas de información, los mapas ayudan a la visualización de información geográfica [6]. Los autores plantean que cada modelo geográfico es una recolección de superposiciones temáticas utilizadas para la representación de una localización geográfica y su forma, así como la descripción de las características geográficas. Estos datos son almacenados en una base de datos, la cual contiene capas de información o *shapefiles*, con una serie de tablas relacionales que representan la realidad por medio de puntos, líneas y polígonos, creando así un marco de referencia para el modelaje de sistemas naturales y hechos por el hombre [6].

Sobre los deslizamientos y la utilización de SIG como herramienta para el procesamiento y elaboración de mapas, Praveen Kumar Rai, Kshitij Mohan y V.K. Kumar [7] mencionan cuáles son aquellos factores que accionan de manera significativa los deslizamientos de tierra. El primer factor son las lluvias fuertes y prolongadas, seguido del corte y excavación de pendientes para el uso de terreno sin llevar a cabo removido de escombros de

forma adecuada, y por último los movimientos de tierra por terremotos o temblores. Según los autores, la estabilidad de la pendiente depende de cinco factores: ángulo y altitud de la pendiente, litología, estructura, condiciones hidrológicas y la sensibilidad del área. “La elaboración de un buen mapa de áreas susceptibles a deslizamientos va a depender de la cantidad y calidad de datos existente, la escala del trabajo y la selección de metodología apropiada para el análisis y modelaje de información” [7], son base de este proyecto.



**Figura 3**

**Mapa de elevaciones en el área de estudio**

Para tener un precedente de qué áreas se han afectado por deslizamientos causados por lluvias, huracanes o tormentas en Puerto Rico, se encontró el trabajo realizado por Pando, Ruiz y Larsen [8]. En el se hace un resumen de aquellos eventos de lluvia significativos en Puerto Rico y cuáles han sido los daños reportados desde 1959 hasta 2003. Los deslizamientos en Puerto Rico han ocasionado daños significativos tanto a propiedad como vidas, con un saldo de 147 muertes desde 1960 hasta 1985 [8]. En octubre de 1985, el Barrio Mameyes de Ponce experimentó el peor desastre de la historia de Estados Unidos con el deslizamiento ocasionado por una tormenta tropical, que destruyó alrededor de 140 viviendas y provocó 130 muertes [8, 9]. Además, se menciona que Puerto Rico ha tenido alrededor de 41

tormentas que han provocado deslizamientos, lo que arroja un promedio de 1.2 deslizamientos al año, ya que las altas elevaciones son una de las características de áreas susceptibles a deslizamientos. La zona montañosa del centro de Puerto Rico (Cordillera Central) ubica la mayor incidencia de deslizamientos. Una de las observaciones identificadas en este artículo lo es la “necesidad de un análisis más exhaustivo de los datos disponibles para ayudar a las entidades gubernamentales a implementar una estrategia de mitigación de deslizamientos en Puerto Rico siguiendo lineamientos similares a los recientes propuestos por el Programa de Mitigación del USGS” [8]. Además, la localización geográfica de la isla hace de ella una de las ubicaciones con mayor frecuencia de ocurrencia de huracanes en América del Norte. La temporada de huracanes se extiende desde junio a noviembre, en donde los meses de agosto y septiembre tienen un 84% de ocurrencia de huracanes [8].

Un evento que ocasionó alrededor de 400 deslizamientos en la zona este de Puerto Rico fue el huracán Hugo, el cual tuvo lugar en septiembre 1989 [10]. Este huracán trajo consigo 339 mm de lluvia y a su vez un 97% de los topes de los árboles en el área de la cuenca del río Mameyes y el río Sabana fueron destruidos. La mayoría de los deslizamientos fueron identificados por medio de imágenes aéreas, mientras que otros fueron calculados por el promedio de material erosionado por deslizamiento y la recurrencia de 10 años de eventos de lluvia [9]. Las características de mapeo de deslizamientos fueron la extensión del área, la pendiente, tipo de deslizamiento y el uso del terreno, al igual que se realizó trabajo de campo luego de dos días del evento. El 71% de los 121 deslizamientos identificados por trabajo de campo estaban asociados con daños en las carreteras, mientras que un 17% se encontraban en pastizales abandonados y un 12% en topes de montañas boscosas [10]. “Este huracán saturó de forma rápida la superficie del suelo, lo que causó que aumentara la presión de los poros del suelo, lo suficiente para ocasionar deslizamientos superficiales, antes de que aumentara

dicha presión y causaran mayores deslizamientos” [10]. Mantener récord de los daños de este tipo de eventos ayuda a tener una idea de qué se puede esperar al momento de ocurrir eventos similares.

El último desastre experimentado en Puerto Rico que ocasionó una cantidad significativa de deslizamientos fue el huracán María. Este evento comenzó el 20 de septiembre de 2017 a las 6:15 a.m., reportándose alrededor de 250mm de lluvia en 48 horas [11]. El huracán María provocó alrededor de 40,000 deslizamientos, en donde carreteras fueron afectadas y comunidades quedaron aisladas por largos periodos de tiempo [11]. La identificación de deslizamientos en Puerto Rico fue realizada mediante imágenes de satélites, tomadas en los meses de septiembre y octubre de 2017. Las cicatrices del terreno fueron visibles a causa de los fuertes vientos que deforestaron la Isla, así como el contraste de colores en el suelo, las rocas y el poco follaje que permanecía [11]. De los hallazgos se identificó que la saturación de lluvia en el terreno fue uno de los factores significativos en la susceptibilidad del terreno ante deslizamientos [11], factor que ha sido identificado en estudios anteriores.

Luego del paso del huracán María por Puerto Rico, la Junta de Planificación (JP) fue designada para la revisión y desarrollo de los planes de mitigación de riesgo para los 78 municipios de Puerto Rico. La JP comenzó con la revisión de 12 planes que se encontraban vencidos, para así continuar con los municipios restantes [12]. El plan del MAG se encuentra en vigencia en estos momentos desde el 2016, y tendrá que pasar por revisión ante *Federal Emergency Management Agency (FEMA)*, el próximo año 2021. Ya que esta actualización es el próximo año, se están tomando las medidas necesarias para obtener los datos actualizados para la elaboración de nuevos mapas y la determinación de nuevos proyectos de mitigación para el municipio. Uno de los grandes retos a la hora de recuperar información relacionada a estos eventos lo es el formato de esta. En muchas ocasiones el equipo de la Oficina de Planificación y Ordenación Territorial del MAG ha tenido

dificultad al momento de identificar las áreas en donde se reportan eventos, ya que no existe una estandarización de datos recopilados y no hay una descripción adecuada del área de estos.

## METODOLOGÍA

La primera etapa de este proyecto lo es la recopilación de datos y textos relevantes al tema de deslizamientos, el uso de SIG para la elaboración de mapas y análisis, así como la revisión de investigaciones y proyectos basados en este tema. Como base fundamental se escogieron dos textos identificados en la revisión de literatura, el Plan Federal de Mitigación Multi-Riesgo [3] del MAG, el mapa y trabajo realizado por Monroe [5], y el proyecto más reciente en deslizamientos por el Programa SLIDES-PR [1].

En la segunda etapa se recopilaron geodatos relevantes al tema de deslizamientos. Primero se identificaron aquellos datos de mayor accesibilidad en la página del Gobierno de Puerto Rico, (<http://www.gis.pr.gov/descargaGeodatos>). En esta página se adquirieron los datos de tipos de suelo, elevación, cuerpos de agua y límites de jurisdicción. Otros datos espaciales específicos fueron solicitados en la Oficina de Planificación y Ordenación Territorial del MAG. Los mismo fueron: calles y caminos, uso de suelos, facilidades municipales y eventos de deslizamientos identificados. Por último, los datos de eventos de deslizamientos causados por el huracán María fueron encontrados en la página oficial del Programa SLIDES-PR [1] de la Universidad de Puerto Rico, Recinto Universitario de Mayagüez (UPR-RUM). Estos datos se hicieron público en verano del 2019 y es un proyecto de múltiples fases que se activó un mes después del paso del huracán por la Isla en 2017. El proyecto SLIDES-PR [1] es una colaboración entre el Departamento de Geología de la UPR-RUM, el *United States Geological Survey (USGS)*, *United States Department of Agriculture- Natural Resources Conservation Service Caribbean Area (USDA-NRCS)*, *University of Colorado Boulder-Natural Hazards Center* y la Junta de Planificación

de PR. A raíz de este proyecto, se identificaron alrededor de 40,000 deslizamientos en todo Puerto Rico, los cuales pueden ser visualizados en el mapa interactivo encontrado en su página oficial [1]. Otra fuente importante para esta investigación es la imagen aérea ortorectificada del área sur de Guaynabo. Para esto se optó por la utilización de la imagen 2017 de la NOAA, tomada luego del huracán María. En aquellas áreas difíciles de identificar por el componente nube en la imagen, se utilizó la imagen oficial de la Junta de Planificación de 2010. Con esta imagen se pudo observar de forma clara el área de los eventos de deslizamientos e identificar mejor con la realidad.

La tercera etapa del proyecto es la elaboración de mapas y análisis con los geodatos adquiridos. Además de los mapas mencionados en la revisión de literatura, en donde se presenta el contexto geográfico del municipio de Guaynabo, el área de estudio y las elevaciones del área de estudio, se realizó otra serie de mapas. Se mostraron los eventos de deslizamientos luego del paso del huracán María [1], identificando aquellos deslizamientos dentro de los límites del área de estudio y aquellos eventos identificados por el MAG a modo de comparación. Otros mapas que se realizaron son aquellos con los tipos de suelos del área de estudio y pendientes de elevación. Al tener todos estos datos se puede tener una visualización clara de las áreas susceptibles a deslizamientos y se comenzó a identificar las zonas vulnerables.

Como parte final de este estudio se trabajó la creación de un mapa de áreas susceptibles a deslizamientos, utilizando la capa de información de suelos del MAG, la pendiente y eventos reportados. El primer paso por tomar lo fue la creación de un modelo de elevación digital (DEM, por sus siglas en inglés) con las líneas de contorno de elevación del USGS, disponible en la página del gobierno de Puerto Rico y que su última revisión fue del 2005. Las herramientas usadas en el software ArcGIS, fueron de la caja de herramientas “*3D Analyst Tool*”, la opción de interpolación raster- *Topo to Raster*. Con esta utilidad se convierten las líneas de contorno de elevación a un formato de DEM, para

que sea más atractivo a la vista del público. Seguido, se identificó la pendiente de las elevaciones con la herramienta “*slope*” de la caja “*Spatial Analyst Tool, Surface*”. Los resultados de pendiente obtenidos fluctúan de .019° a 38. 40°, de modo que aquellas áreas de 16. 41° a 38. 40° son las que se deben tomar en cuenta para la identificación de eventos significativos de deslizamientos. Al tener estos datos se puede tener una idea clara de cómo se comporta el terreno y de ahí pasar a la ubicación de eventos dentro de estas zonas.

## **ANÁLISIS REALIZADO Y RESULTADOS**

Al analizar el mapa de susceptibilidad de Monroe [5] se pudo observar que el área sur de Guaynabo es moderada y mayormente susceptible a deslizamientos. Existen dos áreas identificadas como mayormente susceptible a deslizamiento: el camino Feliciano del barrio Hato Nuevo y en la Carr. PR-174, en el barrio Sonadora. En ambas áreas se reportaron daños en carreteras por el paso del huracán María. En la zona señalada como moderadamente susceptible [5] se pudieron identificar dos proyectos realizados por el municipio, como respuesta al paso del huracán María. Uno se encuentra en el barrio Sonadora, en el camino Gilo Maldonado. En dicho lugar, se desprendió parte de la carretera por los deslizamientos de terreno, poniendo en peligro la vida de los ciudadanos que transitaban por esta zona y las residencias adyacentes. Otro proyecto realizado lo fue en el camino La Cantera, localizado en el barrio Hato Nuevo.

La acción para tomar ante eventos de deslizamiento se puede denotar como una reacción y no tanto a mitigación. A pesar de que existen 13 proyectos de mitigación ante eventos de deslizamientos en el Plan de Mitigación [3], 10 de estos son en el sur del municipio y ya cuatro se encontraban completados o en construcción al momento de la revisión del plan en 2016. Entre los proyectos propuestos por el Plan de Mitigación [3] se encuentra la construcción de muros y

estabilización de talud, reforzar estructuras, estabilizar terreno y relocalización de familias.

La utilización de SIG en el Plan de Mitigación [3] va más bien dirigido a la creación de mapas, pero no se realizan tantos análisis como los que *softwares* como ArcGIS pueden realizar. Algunos de los mapas que se encuentran en el Plan de Mitigación [3] lo son de susceptibilidad a eventos de inundación con datos oficiales de FEMA, límites de jurisdicción, datos de población, calificación y clasificación de suelos, tipos de suelos, hidrología, u otros datos geográficos del municipio. Uno de los análisis que se lleva a cabo en la Oficina de Planificación y Ordenación Territorial del MAG lo es la localización de proyectos de mitigación. La identificación de localidades para la elaboración de proyectos se determina según los eventos recurrentes reportados a las Oficinas de Manejo de Emergencias municipales. Al tener los eventos reportados, estos son localizados por medio de SIG y se observa su recurrencia. Si estos eventos son perjudiciales para vida o propiedad, se toman las medidas adecuadas para la creación de proyectos de mitigación en el área.

En el trabajo realizado por el Programa SLIDES-PR [1], se pudo identificar que la mayoría de los deslizamientos señalados no presentan riesgo a carretas o propiedad privada, ya que muchos de estos se encontraban en terrenos lejos de propiedades o caminos. El Programa [1] identificó alrededor de 74 deslizamientos en el área de estudio, mientras que aquellos identificados por el municipio fueron 15. De todos los deslizamientos identificados, solo dos de estos coincidían en su localización. Ambos deslizamientos se encontraban en el barrio Sonadora, uno en el sector Los Báez, mientras que el segundo en el camino El Gato. Dichos deslizamientos forman parte del inventario de daños por el huracán María del municipio. El Programa SLIDE-PR [1] utilizó imágenes de satélite para su inventario, en donde se puede observar acumulación de nubes en el área de estudio. Ese es uno de los problemas que se muestra en las imágenes tomadas por la NOAA luego de los huracanes Irma y María. Como ejemplo se pudo observar el área de la Carr. PR-173 de barrio Río al

barrio Hato Nuevo. Otra área lo es el camino Limones en el barrio Hato Nuevo.



Figura 4

**Captura de pantalla de la página oficial de FEMA con imágenes aéreas de Puerto Rico creadas por la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) luego del paso de los huracanes Irma y María**

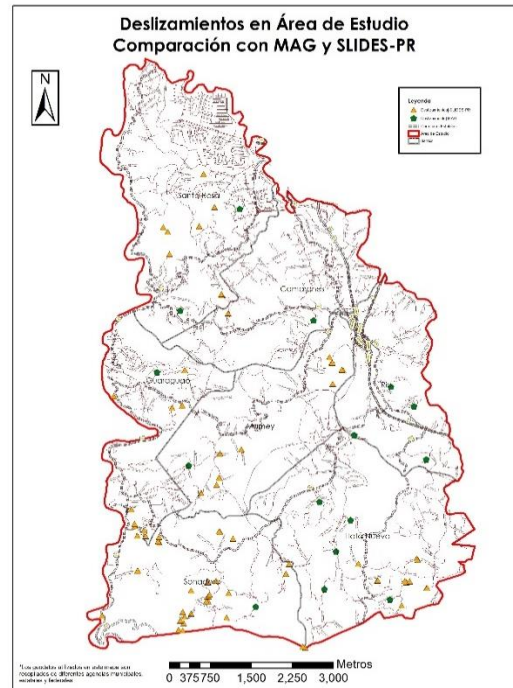


Figura 5

**Deslizamientos recopilados por el Programa SLIDE-PR y por el municipio autónomo de Guaynabo**

Antes de ubicar los eventos, se revisó que tipo de suelo es el que predomina en el área de estudio. La capa de suelos disponible [18] data del año 2006 y fue una colaboración de la UPR y la JP. El área de estudio consta de 23 tipos de suelos diferentes, de los cuales 2 son los que ocupan una mayor cobertura. El tipo de suelo Múcara Arcilloso (MxF)

acapara un 45% del área de estudio; este suelo se caracteriza por tener buen drenaje en las pendientes y en la cima de los cerros de las tierras altas húmedas. La permeabilidad es moderada, es difícil de trabajar debido a lo empinado y por la plasticidad y pegajosidad de la arcilla. Este tipo de suelo está limitado para la mayoría de los usos urbanos por ser bien empinado y de superficie rocosa [2]. Otro tipo de suelo que es significativo en el área de estudio es el Naranja Limo Arcilloso Límico (NaF2), cubre un 16% del área de estudio y posee características similares al tipo de suelo MxF [2]. Este tipo de suelo se expone a una gran cantidad de erosión por el clima de la región, por lo que ha perdido su capa superficial.

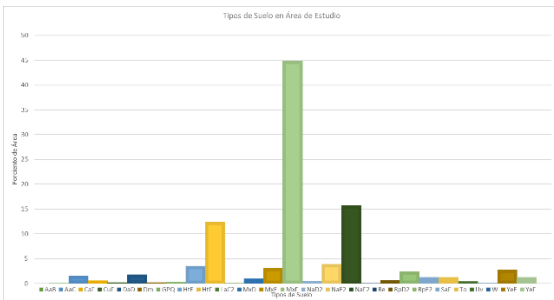


Figura 6

Tabla de porcentajes de área de tipos de suelos en el área de estudio.

Durante el periodo de tiempo del 2011 al 2015 se reportaron alrededor de 183 eventos de deslizamientos en todo el municipio de Guaynabo, de los cuales 147 se encontraban en el área de estudio de este proyecto de investigación. Se observaron los eventos reportados luego del paso de los huracanes Irma y María, los cuales consistían en 15 eventos que ocasionaron daños a carreteras, pero estos no representaron un patrón con relación a eventos pasados. Por tanto, con los datos de pendiente, tipos de suelos y eventos reportados del 2011 al 2015, se realizó una intersección por localización con el programa ArcGIS, en donde se precisan un total de 43 eventos de deslizamientos en las áreas con pendientes significativas con tipos de suelo MxF y NaF2. Al tener esta información se pueden identificar las zonas susceptibles a deslizamiento, que a su vez ayuda a divisar cuáles son aquellas

propiedades o carreteras que podrían verse afectadas. Como resultado de este proyecto, se creó un mapa mostrando aquellas áreas que pueden ser susceptibles a deslizamientos según los suelos MxF y NaF2. Estos eventos están identificados por medio de una capa de puntos, de la cual se pudo crear una nueva capa con una zona de amortiguamiento o "buffer zone" de 20 metros, lo que implicaría el área que podría verse afectada si pasara algún deslizamiento.

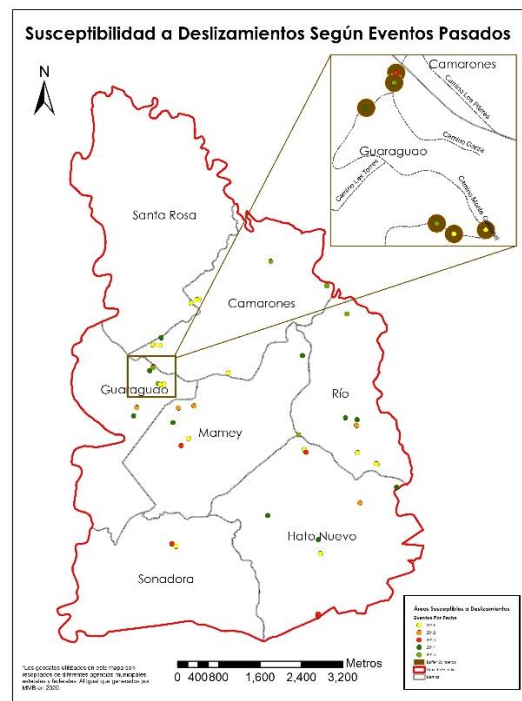


Figura 7

Mapa de susceptibilidad a deslizamientos según eventos pasados, del 2011 al año 2015.

## CONCLUSIÓN

El huracán María fue un grito de advertencia para todo Puerto Rico, en especial para las agencias gubernamentales que responden a este tipo de eventos de emergencia, ya que fue un evento sin precedente. Con este tipo de fenómeno, se dejó ver la importancia de la planificación para el manejo de situaciones de crisis social y respuesta, así como lo esencial que es tener un plan de mitigación actualizado y claro. Muchos municipios de Puerto Rico aún no se han podido recuperar de estos eventos



y la pobre respuesta de FEMA ante la situación del país, ha hecho difícil el poder restaurar gran parte de las facilidades afectadas. Este es el caso de muchos proyectos programados e inconclusos.

Al concluir este proyecto se pudo cumplir la mayor parte de los objetivos. Entre las limitaciones del estudio no se pudo realizar un análisis SIG entre los datos de eventos de deslizamientos causados por el huracán María y eventos pasados ocurridos como consecuencia de otros fenómenos atmosféricos. A pesar de que el trabajo realizado por SLIDES-PR es uno robusto, este no mostró ser significativo para este estudio, ya que el área de estudio se mostraba comprometida con poca visibilidad por la cantidad de nubes identificadas en las imágenes de la NOAA. La identificación de zonas susceptibles a deslizamientos fue divisada gracias a la utilización de los SIG, lo que se deja ver como una herramienta de suma importancia para la creación de mapas, gráficas y análisis relacionados a la mitigación de proyectos, pero todo análisis requiere de una estructura de base de datos exacta, precisa y consistente, para tener un resultado favorable que sirva de plantilla ante la creación de proyectos de mitigación en cada municipio. Un aspecto limitante lo es la estandarización de datos, ya que debe ser discutida y compartida con las dependencias que trabajan directamente con los eventos, que en el MAG tales como Manejo de Emergencias y la Policía. El mantener un récord anual de este tipo de información espacial ayuda a la elaboración de mejores mapas de susceptibilidad a diferentes tipos de eventos, facilitando además la recopilación de datos para la revisión de los planes de mitigación a nivel federal y la ubicación de futuros proyectos. Además, los datos deben ser analizados de forma anual para así tener la información necesaria al momento de la revisión total del plan de mitigación. No se debe tener preferencia de eventos, ya que todos son importantes a la hora de salvar vidas y propiedad.

A lo largo de la revisión de literatura de este proyecto se pudo identificar varios estudios realizados con datos de pendiente de elevación y eventos recurrentes, pero utilizando capas de

información de la geología del lugar. Para este proyecto se quiso tomar otra vertiente. Con eventos esporádicos y fenómenos atmosféricos, la capa superficial o tipo de suelo, es la primera que sufre daños y es la que afecta en la gran mayoría propiedad y carreteras. La geología del lugar es importante para estudios más detallados, pero para análisis relacionados a la planificación de proyectos de protección y mitigación, el tipo de suelo es fundamental para conocer qué sectores se podrían ver más afectados. Como estudios futuros se recomienda hacer un análisis más detallado, esto con datos de usos de suelo, precipitación o geología, al igual que más estudios de campo en donde se pueda recolectar data de elevación y evaluación del área. De esta forma se tiene una idea más amplia de los comportamientos que pueden accionar deslizamientos y se pueden crear mejores mapas de susceptibilidad.

Como punto importante a tomar en consideración para la ubicación de proyectos de mitigación en los municipios es la recurrencia de eventos pasados, pero la realidad del caso ha sido algo diferente. Al localizar los proyectos programados bajo el tópico de deslizamientos en el Plan de Mitigación Multi- Riesgo [3], se pudo observar que la gran mayoría de estos se encontraban alejados de los eventos reportados, aunque sí estaban localizados en los tipos de suelos vulnerables que se identificaron en este estudio. Por tal motivo, se le sugiere al municipio evaluar proyectos de mitigación futuros según los parámetros antes mencionados de pendiente de elevación, tipo de suelo y recurrencia de eventos de deslizamientos.

Una recomendación para que el municipio les provea esta información a los ciudadanos lo es a través de una aplicación web. Este tipo de aplicación se puede hacer de forma gratuita en *ArcGIS Online*, una de las herramientas que la compañía proveedora de SIG, Esri, tiene disponible en su plataforma virtual. Otra opción lo es una aplicación móvil, también disponible en Esri con su herramienta de “*app builder*”; con esta aplicación se podría crear una opción de reportar eventos para integrar a la ciudadanía a los problemas que pudieran afectar a su

comunidad. Para ambas opciones solo necesitas tener una cuenta en la plataforma digital de Esri, en la cual puedes crear mapas con información en *ArcGIS Online* o capas que subas a la misma. Lo mejor de estas opciones es que no debes tener ningún conocimiento en programación y que es gratis para sus usuarios.

En este proyecto no se creó un mapa de susceptibilidad con datos del 2017, ya que los mismos datan luego del paso de los huracanes Irma y María hasta el mes de mayo del 2018. Al no tener un patrón de recolección de datos, no se puede tener un análisis significativo de los eventos. Además, los huracanes de septiembre de 2017 indican un evento sin precedentes, por lo cual no se tomaron en cuenta para esta parte del proyecto. Sin embargo, se deben utilizar estos datos para un análisis detallado en un futuro, manteniendo una secuencia temporal antes de la revisión del plan de mitigación del municipio de Guaynabo. La información y análisis realizados en este proyecto esperan ser compartidos con personal de la Oficina de Planificación y Ordenación Territorial del municipio de Guaynabo.

## REFERENCIAS

- [1] SLIDES-PR, Department of Geology at the University of Puerto Rico- Mayagüez. Disponible: <https://sites.google.com/a/upr.edu/geology/research/slides-pr>. [Accesado diciembre 2019].
  - [2] Oficina de Planificación y Ordenación Territorial, *Revisión Integral del Plan de Ordenación Territorial Vol. II*. Guaynabo: Municipio Autónomo de Guaynabo, p. 5, 2010.
  - [3] Oficina de Planificación y Ordenación Territorial, *Plan Federal de Mitigación Multi-Riesgo*. Guaynabo: Municipio Autónomo de Guaynabo, p. 54-94, 274-275, 295-387, 2016.
  - [4] S. Stichter, Caribbean Disaster Mitigation Project (CDMP). *The Caribbean Disaster Project: Supporting Sustainable Responses to Natural Hazards*, 1999. Disponible: <https://www.oas.org/CDMP/document/papers/gisconf.htm>. [Accesado noviembre 2019].
  - [5] W.H. Monroe, "Map Showing Landslides and Areas of Susceptibility to Landsliding in Puerto Rico" in *Miscellaneous Investigations Series, Map 1-1148*. Arlington: VA, Department of Interior, United States Geological Survey, 1979.
  - [6] M. Zeiler and J. Murphy, "Inside the geodatabase" in *Modeling Our World, The Esri Guide to Geodatabase Concepts*. Redlands, CA: Esri Press, 2010, p. 2-19.
  - [7] P. Kumar Rai, K. Mohan and V.K. Kumar. Landslide Hazard and its Mapping Using Remote Sensing and GIS. *Journal of Scientific Research*, vol. 58, pp. 1-13, 2014.
  - [8] M. Pando, M. Ruiz y M. Larsen, "Deslizamientos en Puerto Rico Producidos por Lluvias: Descripción General" en *International Journal of Natural Disasters, Accidents and Civil Infrastructure*, vol. 4, no.1, pp. 53-66, 2004.
  - [9] Ecoexploratorio, Museo de Ciencias de Puerto Rico, San Juan, Puerto Rico. Disponible: <https://ecoexploratorio.org/amenazas-naturales/derrumbes/derrumbes-en-puerto-rico/> [Accesado abril 2020]
  - [10] M.C. Larsen y A. J. Torres Sanchez, "Landslides Triggered by Hurricane Hugo in Eastern Puerto Rico, September 1989", *Caribbean Journal of Science*, vol. 28, no. 3-4, pp. 113-125, 1992.
  - [11] E.K. Bessette-Kirton, C. Cerovski-Darriau, W.H. Schulz, J.A. Coe, J.W. Kean, J.W. Godt, M.A. Thomas and K.S. Hughes, "Landslide Triggered by Hurricane Maria: Assessment of an Extreme Event in Puerto Rico", *GSA Today*, vol. 29, no. 6, 2019. Disponible: <https://doi.org/10.1130/GSATG383A.1>. [Accesado agosto 2019].
  - [12] Planes de Mitigación ante Eventos Naturales, Junta de Planificación de Puerto Rico. Disponible: <http://cedd.pr.gov/Mitigacion/> [Accesado marzo 2020]
- ### TABLA DE FIGURAS
- [13] M. Martínez, *Área de estudio y su localización dentro del Municipio Autónomo de Guaynabo*, marzo 2020. Geodatos Disponible: <http://www.gis.pr.gov/descargaGeodatos/Pages/default.aspx> [Accesado enero 2020].
  - [14] M. Martínez, *Áreas susceptibles según estudio realizado por Watson H. Monroe en 1979*, marzo 2020. Geodatos Disponible: <http://www.gis.pr.gov/descargaGeodatos/Pages/default.aspx>. [Accesado enero 2020].
  - [15] M. Martínez, *Mapa de elevaciones en el área de estudio*, febrero 2020. Geodatos Disponible: <http://www.gis.pr.gov/descargaGeodatos/Pages/default.aspx> [Accesado enero 2020].
  - [16] Hurricane MARIA Aerial Imagery Response. Captura de pantalla. Disponible: <https://storms.ngs.noaa.gov/storms/maria/index.html#12/18.3504/-66.1587> [Accesado marzo 2020]
  - [17] M. Martínez, *Deslizamientos recopilados por el Programa SLIDE-PR y por el Municipio Autónomo de Guaynabo*, febrero 2020. Geodatos obtenidos de: Programa SLIDE-PR Disponible: <https://sites.google.com/a/upr.edu/geology/research/slides-pr>; Oficina de Planificación y Ordenación Territorial del Municipio Autónomo de Guaynabo. [Accesado febrero 2020].
  - [18] M. Martínez, *Table de porcentajes de área por tipo de suelos en el área de estudio*, marzo 2020. Geodatos Disponible: <http://www.gis.pr.gov/descargaGeodatos/Pages/default.aspx> [Accesado enero 2020].
  - [19] M. Martínez, *Mapa de susceptibilidad a deslizamientos según eventos pasados, del 2011 al año 2015*, abril 2020. Geodato de eventos pasados, límites de jurisdicción y carreteras fueron obtenidos de: Oficina de Planificación y Ordenación Territorial del Municipio Autónomo de Guaynabo.