

CONTRIBUCIONES E INNOVACIONES EN LA PRÁCTICA DE LA INGENIERÍA GEOTÉCNICA DE LA OFICINA DE INGENIERÍA DE SUELOS DE LA AUTORIDAD DE CARRETERAS Y TRANSPORTACIÓN DE PUERTO RICO¹

Ricardo J. Romero-Ramírez², María E. Arroyo-Caraballo³

RESUMEN: La Oficina de Ingeniería de Suelos (OIS) de Puerto Rico fue fundada en el 1975 y en la actualidad está adscrita al Área de Diseño de la Autoridad de Carreteras y Transportación (ACT). En su fundación la OIS estaba compuesta de la División de Ingeniería de Suelos y la División de Geología. Su función principal era la investigación del subsuelo para las estructuras geotécnicas diseñadas y construidas por la ACT. Con el transcurso del tiempo las funciones de la OIS fueron evolucionando al mismo tiempo que se desarrollaba la ingeniería de suelos y la ingeniería de rocas. En el presente la OIS continúa atendiendo consultas durante la etapa de diseño y construcción. En adición, la OIS atiende una serie de innovaciones geotécnicas en las que podemos mencionar Gerencia de Activos Geotécnicos y Gerencia de Taludes Inestables, entre otras. En este artículo se presentan las contribuciones e innovaciones en la práctica de la ingeniería geotécnica que ha atendido y ha tenido un rol protagónico la OIS con énfasis en los nuevos análisis y equipos que cumplen con los requerimientos estatales y federales y códigos vigentes que tienen un potencial de implantarse en áreas geográficas con similares características geotécnicas y geológicas en el Caribe y América latina.

Palabras claves: escaneo láser terrestre, gerencia de activos geotécnicos, gerencia de taludes inestables, ingeniería geotécnica, sistemas de información geográficos

CONTRIBUTIONS AND INNOVATIONS IN THE GEOTECHNICAL ENGINEERING PRACTICE OF THE SOILS ENGINEERING OFFICE OF THE PUERTO RICO HIGHWAYS AND TRANSPORTATION AUTHORITY

ABSTRACT: The Puerto Rico Soil Engineering Office (OIS) was founded in 1975 and is currently under the Design Area of the Highway and Transportation Authority (ACT). In its foundation, the SEO was composed of a Soils Engineering Division and a Geology Division. Its main function was the subsoil exploration for the geotechnical structures designed and constructed by the PRHTA. Over time, the functions of the SEO evolved while soil engineering and rock engineering were evolving. Today, the SEO continues to attend to inquiries during projects' design and construction phases. Additionally, the SEO attends several geotechnical initiatives like Geotechnical Asset Management and Unstable Slope Management. This article presents the contributions and innovations in the practice of geotechnical engineering that the OIS has attended and has had a leading role with emphasis on new analyzes and equipment that meet state and federal requirements and current codes that have potential to be implemented in geographic areas in the Caribbean and Latin America with similar geotechnical and geological characteristics.

Keywords: terrestrial laser scanning, geotechnical asset management, unstable slope management, geotechnical engineering, geographic information systems

¹ Artículo recibido el 4 de abril de 2023 y aceptado para publicación el 18 de abril de 2023

² Jefe de Oficina de Ingeniería, Oficina de Ingeniería de Suelos, Autoridad de Carreteras y Transportación de Puerto Rico, P.O. Box 42007, San Juan, PR 00940-2007. Email: rromero@dtop.pr.gov

³ Ingeniero III, Oficina de Ingeniería de Suelos, Autoridad de Carreteras y Transportación de Puerto Rico. Email: mearroyo@dtop.pr.gov

INTRODUCCIÓN

La Autoridad de Carreteras (AC) de Puerto Rico es una corporación pública creada al amparo de la Ley 74 del 23 de junio de 1965 (ELA, 1965). En sus comienzos, la AC era responsable de desarrollar, operar y mantener las autopistas, expresos, puentes, túneles, entre otras. En la década de 1970, se crea el Negociado de Pruebas de Materiales, Suelos y Geología. Posteriormente, en el 1975, se crea la Oficina de Ingeniería de Suelos (OIS) la cual estaba compuesta de la División de Ingeniería de Suelos y la División de Geología. El 6 de marzo de 1991 la legislatura de Puerto Rico aprueba la Ley Núm. 1 conocida como la ley de la Autoridad de Carreteras y Transportación (ACT) de Puerto Rico (ELA, 1991). Desde el punto de vista organizacional, bajo la nueva ley, la OIS pertenece al área de diseño de la ACT.

La *misión* de la OIS es proveer servicios geotécnicos para la planificación, diseño, construcción y mantenimiento de un sistema de transportación seguro y accesible para el pueblo de Puerto Rico. La *visión* de la OIS es proveer servicios geotécnicos prácticos, eficientes y de excelencia para el pueblo de Puerto Rico. La OIS atiende los proyectos desde la etapa de diseño hasta la etapa de construcción, así como solicitudes de otras agencias. Además, provee apoyo técnico en los siguientes casos: estabilidad de taludes en suelo y roca, fundaciones profundas (pruebas de carga dinámicas), fundaciones llanas, conductos, sumideros y asentamientos de terraplenes, entre otros.

A partir del año fiscal 2015-2016, la OIS comenzó a participar y colaborar en varios programas e iniciativas innovadoras con fondos provenientes de la Administración Federal de Carreteras (FHWA por sus siglas en inglés), División de Puerto Rico e Islas Vírgenes. Entre las iniciativas innovadoras resaltan los siguientes: el Programa de Investigación y Planificación (SPR por sus siglas en inglés), el programa Cada Día Cuenta (EDC por sus siglas en inglés), el Concilio Estatal de Innovación en Transportación (STIC, por sus siglas en inglés) y el programa de Gerencia de Activos Geotécnicos (GAM por sus siglas en inglés).

Durante el transcurso de este periodo de tiempo de casi cinco (5) décadas, las funciones originales de la OIS han evolucionado para atemperarse con el estado de la práctica de la Ingeniería Geotécnica y las necesidades de la ACT. Entre dichas funciones de la OIS resaltamos las siguientes:

- Exploración de subsuelo mediante equipo de barrenado y equipo geofísico;
- Monitoreo de pilotes mediante pruebas de carga dinámicas y estáticas;
- Monitoreo de terraplenes mediante inclinómetros y piezómetros;
- Implementación de Gerencia de Activos Geotécnicos (GAM por sus siglas en inglés);
- Patrocinio de talleres en ingeniería geotécnica e ingeniería geológica;
- Ofrecimiento de talleres sobre la implementación de Métodos Avanzados de Exploración Geotécnica (A-GaME por sus siglas en inglés) y
- Desarrollo de programas innovadores como monitoreo de taludes en suelo y roca utilizando escaneo láser terrestre.

En este artículo se presentará en más detalle las funciones mencionadas previamente. Finalmente, se expondrán los desafíos, logros y próximos pasos para que el pueblo de Puerto Rico cuente con servicios geotécnicos prácticos, eficientes y de excelencia.

PROGRAMA DE GERENCIA DE ACTIVOS GEOTÉCNICOS DE LA OFICINA DE INGENIERÍA DE SUELOS

De acuerdo con la “*National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine*” (NASEM, 2019), un activo puede ser definido como un objeto, cosa o entidad que tiene valor, potencial o actual, para una organización. La NASEM define activos tangibles (o físicos) como aquellos que forman parte integral del sistema de transportación o corredor. Activos intangibles componen el restante de los activos de una organización como lo son el conocimiento y datos. Por otro lado, la NASEM define la gerencia de activos como el esfuerzo coordinado de una organización para entender el valor de sus activos. Por tanto, la gerencia de activos de transportación es un método estratégico de operación, mantenimiento, mejoramiento y expansión de los activos de transportación a través de su vida útil. El objetivo de un programa de gerencia de activos de transportación es minimizar los costos durante la vida útil de estos mediante la evaluación objetiva y mantenimiento de los activos. Actualmente, el programa de Gerencia de Activos de Transportación de la ACT incluye solo pavimentos y puentes. Dicho programa no incluye activos geotécnicos; los cuales serán descritos a continuación.

Antes de definir activos geotécnicos debemos definir Ingeniería Geotécnica. La Ingeniería Geotécnica es la rama de la Ingeniería Civil que estudia el comportamiento de los materiales terrestres. Esta utiliza los principios de mecánica de suelos y mecánica de rocas para la solución de problemas ingenieriles. Entonces, los activos geotécnicos (tangibles como se discutirá más adelante) son aquellos relacionados a la mecánica de suelos y mecánica de rocas que pueden fallar y afectar el funcionamiento de los sistemas de transportación. Entre los activos geotécnicos tangibles podemos mencionar taludes en roca, taludes en suelo, atarjeas y estructuras de retención (ver Figura 1). Ejemplos de activos geotécnicos intangibles serían reportes geotécnicos y bitácoras de barrenado. En la Figura 2 se pueden apreciar los activos antes mencionados, entre otros. Un programa de gerencia de activos geotécnicos permite a las agencias cuantificar y gerenciar la inversión de capital basado en el desempeño, costo y tolerancia al riesgo. También, puede reducir el costo de reparaciones no planificadas. Sin un programa de gerencia de activos geotécnicos las agencias aceptan la incertidumbre, magnitudes de riesgo desconocidas y toma decisiones de inversión desinformadas.

La OIS sometió al programa SPR, para el año fiscal 2015-2016, las siguientes propuestas: Inventario y Evaluación de Atarjeas, Inventario y Evaluación de Muros de Retención, Inventario de Reportes Geotécnicos y Desarrollo de un Programa de Gerencia de Taludes Inestables. Las tareas propuestas estaban orientadas principalmente a la gerencia de activos geotécnicos dentro del Sistema Nacional de Carreteras (NHS por sus siglas en inglés). Una vez las propuestas fueron aprobadas por la FHWA, se adquirieron computadoras personales, distanciómetros, tabletas, el programa ArcGIS© de la compañía ESRI y se participó en adiestramientos en el uso de dicho programa. Posteriormente, se contrataron servicios profesionales de técnicos en sistemas de información geográfica para crear una serie de formularios de colección de datos de campo en ArcGIS Collector©. Dichos datos eran georreferenciados y subidos constantemente al sistema de nube de ArcGIS conocido como ArcGIS Online. Los detalles específicos de los procesos realizados para cada una de las tareas se mencionarán a continuación.

Inventario y Evaluación de Atarjeas

El Inventario y Evaluación de Atarjeas comenzó con un formulario desarrollado en la OIS basado en la experiencia del personal de la oficina (ingenieros y auxiliares de ingeniería). Los datos se colectaban en el campo mediante el programa ArcGIS Collector©. Posteriormente, se adoptaron las recomendaciones de la FHWA (2012) y se migraron los datos previamente colectados a ArcGIS Survey 123©. Al momento, se han inventariado sobre 4,000 atarjeas alrededor de la Isla.



Figura 1: Activos geotécnicos (modificado de FHWA, 2013).

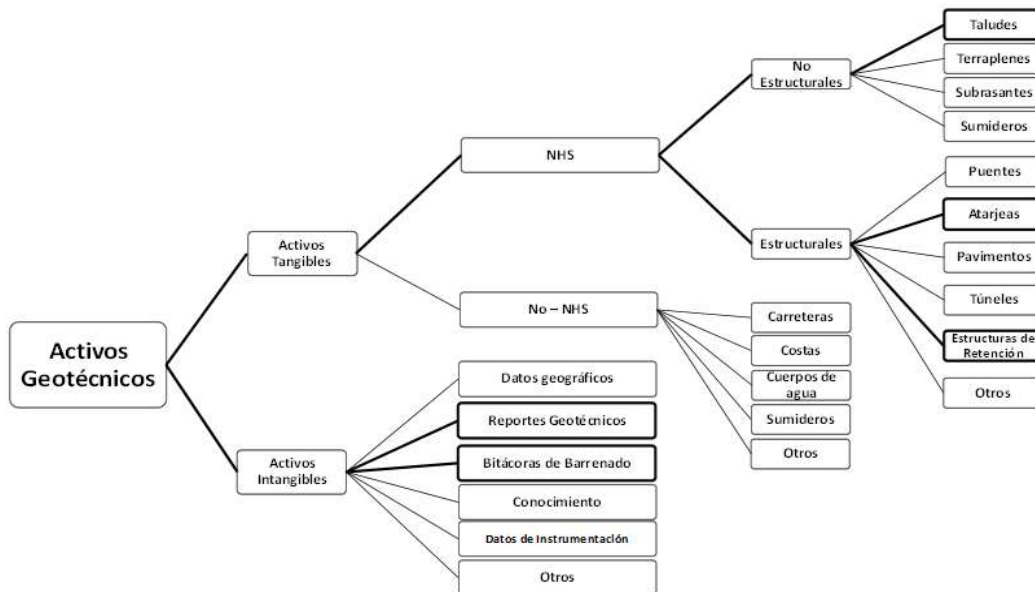


Figura 2: Taxonomía de activos geotécnicos (modificado de NASEM, 2019).

Inventario y Evaluación de Muros de Retención

El Inventario y Evaluación de Muros de Retención también comenzó con un formulario desarrollado por el personal de la OIS el cual fue convertido a una plantilla de ArcGIS Collector©. Luego de haber colectado información de sobre 250 muros, se decidió implementar las recomendaciones del Departamento de Transportación de Carolina del Norte (2015). Los datos previamente colectados fueron migrados a ArcGIS Survey 123©. Sobre 350 muros de retención han sido inventariados.

Inventario de Reportes Geotécnicos

El Inventario de Reportes Geotécnicos fue creado con el propósito de manejar sobre 2,600 reportes geotécnicos que se encuentran almacenados en la OIS y que datan de la década de los 70 hasta el presente. En el principio, dichos reportes eran inventariados utilizando un sistema manual de tarjetas. Luego, el sistema de tarjetas se migró a Microsoft Access. Por último, el Inventario de Reportes Geotécnicos se migró a ArcGIS Online y cada uno de los reportes geotécnicos fueron georreferenciados y escaneados en formato digital de Adobe®. En la Figura 3 podemos observar que los 2,658 reportes contienen 26,277 bitácoras de barrenado. Con esto en mente, la OIS decidió crear un inventario georreferenciado de bitácoras de barrenado. En la Figura 4 podemos apreciar que al momento se han georreferenciado sobre 16,000 bitácoras de barrenado. Finalmente, se creó una aplicación para compartir los reportes geotécnicos con el público y actualmente se encuentra en el proceso de hacer lo mismo con el Inventario de Bitácoras de Barrenado.



Figura 3: Tablero de ArcGIS del Inventario de Reportes Geotécnicos.

Inventario de Taludes

El inventario de taludes se comenzó con un formulario creado por el personal de la OIS basado en experiencias previas. En el 2019 se celebró en la Isla el primer “*Geotechnical Asset Management Peer Exchange*” (GAMPE) y basados en las recomendaciones de los expertos que participaron de dicho evento, se decidió adoptar las recomendaciones establecidas por FHWA (2019). A la misma vez, el alcance del inventario se amplió para incluir la evaluación de los taludes. Esta tarea se conoce como Programa de Gerencia de Taludes Inestables (USMP, por sus siglas en inglés). En el USMP de la ACT se describen, localizan y evalúan las condiciones de los taludes dentro del NHS. El programa incluye cortes en roca y taludes naturales en roca sobre la vía de rodaje. En el caso de taludes en suelos, se decidió inventariar los terraplenes, cortes y taludes naturales. Al momento, se han inventariado sobre 700 taludes, como se puede apreciar en la Figura 5.

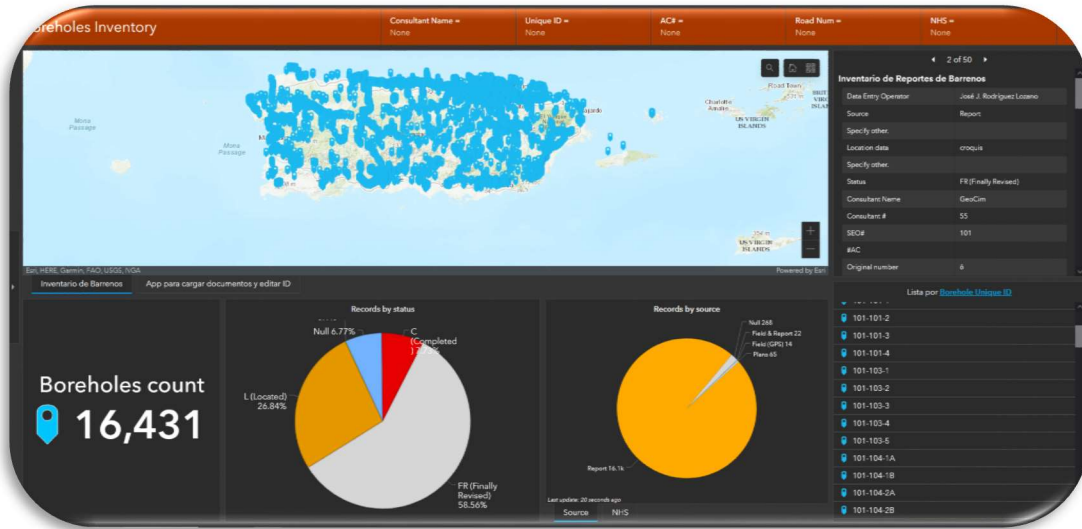


Figura 4: Tablero de ArcGIS del Inventario de Bitácoras de Barrenado.

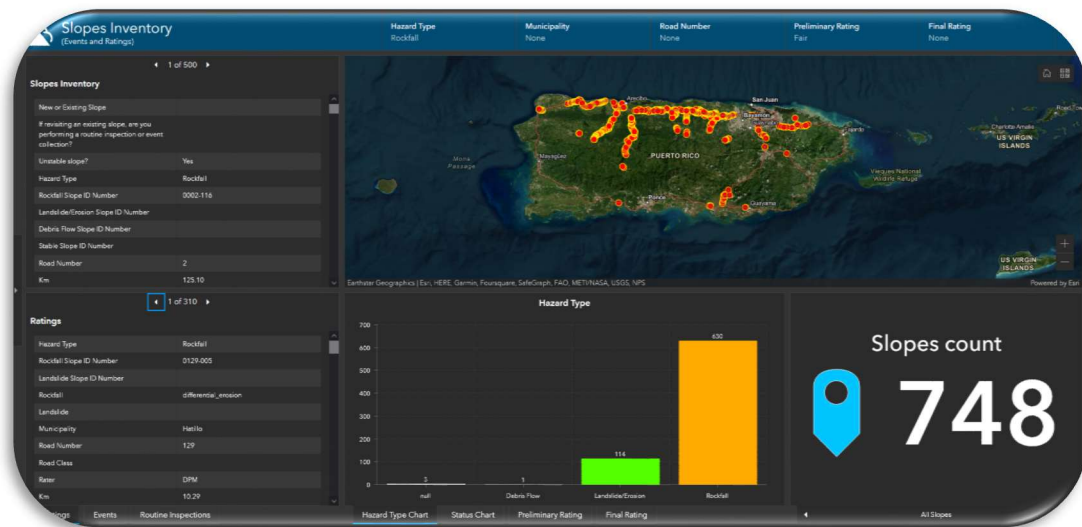


Figura 5: Tablero de ArcGIS del Programa de Gerencia de Taludes Inestables.

OTRAS INICIATIVAS GEOTECNICAS DE LA OFICINA DE INGENIERÍA DE SUELOS

En el año fiscal 2018-2019, la OIS participó de la conferencia anual del programa Cada Día Cuenta (EDC por sus siglas en inglés) de la FHWA. La OIS aceptó ser el campeón de la ACT para la iniciativa de Métodos Avanzados de Exploración Geotécnica (A-GaME por sus siglas en inglés). A-GaME consiste en emplear una serie de tecnologías, que, aunque han probado ser efectivas, son poco utilizadas en la exploración geotécnica. Cuando dichas tecnologías son combinadas con los métodos tradicionales de investigación de subsuelo permiten que se realice una mejor caracterización del subsuelo. Como parte de la iniciativa A-GaME, la OIS celebró un taller virtual en el 2020 en el cual participaron empleados públicos, diseñadores y consultores. Posteriormente, en el 2022, la OIS fue anfitrión del taller Caracterización de Suelos del Instituto Nacional de Carreteras (NHI, por sus siglas en inglés) en el cual se

presentaron varios métodos del A- GaME. Esta innovación, se estará incorporando en la nueva edición del Manual de Guías de Exploración Geotécnica de la OIS.

En el 2022, la OIS participó en la Conferencia de Ingeniería Geotécnica en Transportación del Sureste (STGEC, por sus siglas en inglés) de los Estados Unidos (EE.UU.) La STGEC es una reunión anual que se ha llevado a cabo desde el 1969 cuando la FHWA propuso que los doce estados del sureste (Alabama, Arkansas, Florida, Georgia, Kentucky, Louisiana, Mississippi, North Carolina, South Carolina, Tennessee, Virginia y West Virginia) se reunieran anualmente para discutir problemas de asentamientos y deslizamientos. El STGEC tiene un comité timón que actúa como órgano rector y está compuesto por un miembro de cada agencia de transportación estatal, un miembro de la FHWA y un miembro de la Junta de Investigación en Transportación (TRB, por sus siglas en inglés). El objetivo principal del STGEC es discutir la transferencia de tecnología concerniente a los avances en tecnología sobre ingeniería geotécnica y compartir experiencias o problemas en el campo de la ingeniería geotécnica para alcanzar las metas de tener un sistema de transportación eficiente y económico. La sede de las conferencias del STGEC se rota entre los estados miembros para asegurarse de que cada uno de los estados actúa como anfitrión de la conferencia. En el 2022 la OIS participó en la conferencia STGEC en donde presentó los esfuerzos que se han realizado para implementar un programa de gerencia de activos geotécnicos. El comité timón del STGEC aceptó a un miembro de la OIS de la ACT de Puerto Rico a formar parte de dicho comité. En el 2027, Puerto Rico será la sede de la conferencia STGEC.

La OIS a su vez ha participado por varios años en el “*Highway Geology Symposium*” (HGS). El HGS es una conferencia anual que celebra en diferentes estados de los EE.UU. El HGS fue organizado en el 1950 (hace más de 72 años) para establecer una relación de colaboración entre ingenieros civiles y geólogos para poder atender en conjunto problemas en las carreteras. Cabe señalar que en el HGS del 2022 se llevó a cabo el segundo GAMPE a nivel nacional, siendo el primero, como se mencionó anteriormente, en Puerto Rico.

RETOS Y PRÓXIMOS PASOS DE LA OIS

La OIS ha atravesado en la última década por una serie de desafíos relacionados a la inestabilidad económica de la ACT. Entre los desafíos podemos mencionar los siguientes: falta de personal, equipo, fondos para contratar consultores y entendimiento de la necesidad de un programa de gerencia de activos geotécnicos. La limitación de recursos humanos para realizar los inventarios ha sido tal vez uno de los desafíos más grandes del programa de Gerencia de Activos Geotécnicos de la OIS. El programa de Gerencia de Activos Geotécnicos de la OIS, estará trabajando en nuevas iniciativas considerando los desafíos y retos presentados. Entre las iniciativas y metas a partir del 2023 podemos mencionar:

1. Someter nuevas propuestas al SPR;
2. Tratar de incorporar el programa de Gerencia de Activos Geotécnicos dentro del programa global de Gerencia de Activos de Transportación de la ACT;
3. Complementar el Programa de Gerencia de Taludes Inestables (USMP) utilizando un escáner láser terrestre y desarrollar un programa de notificación de movimientos de taludes inestables;
5. Establecer un procedimiento para que los consultores sometan los reportes geotécnicos en un formato digital uniforme para continuar mejorando el Inventario de Reportes Geotécnicos;
6. Desarrollar una base de datos georreferenciada que pueda interactuar con las otras bases de datos de la ACT (e.g., puentes y pavimentos);

7. Crear un sistema de acceso para que el público (consultores, diseñadores, etc.) pueda acceder las bases de datos de los inventarios de reportes geotécnicos y bitácoras de barrenado; y
8. Georreferenciar los tramos de carretera que componen el sistema NHS de tal forma que pueda interactuar con las otras bases de datos georreferenciadas de la OIS.

REFERENCIAS

- Estado Libre Asociado de Puerto Rico. (1965). Ley de la Autoridad de Carreteras de Puerto Rico. Ley Núm. 74 de 23 de junio de 1965. 9 L.P.R.A.
- Estado Libre Asociado de Puerto Rico. (1991). Ley de la Autoridad de Carreteras y Transportación de Puerto Rico. Ley Núm. 1 de 6 de marzo de 1991. 9 L.P.R.A.
- Federal Highway Administration. (2010). Culvert Assessment and Decision-Making Procedures Manual for Federal Lands Highway, Publication No. FHWA-CFL/TD-10-005. <https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/50273>.
- Federal Highway Administration. (2013). Geotechnical Asset Management Implementation Concepts and Strategies. Publication No. FHWA-CFL/TD-13-003.
- Federal Highway Administration. (2019). Unstable Slope Management Program for Federal Land Management Agencies. Publication No. FHWA-FLH-19-002.
- National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. (2019). Geotechnical Asset Management for Transportation Agencies, Volume 2: Implementation Manual. Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/25364>.
- North Carolina Department of Transportation. (2015). Retaining Wall Inventory and Assessment System. Publication No. FHWA/NC/2014-10.