



Ingeniería y Agrimensura **Dimensión**

Revista del Colegio de Ingenieros y Agrimensores de Puerto Rico
Año 33, Vol. 1, 2019 Disponible en el internet: www.ciapr.org

Transformación del sistema eléctrico de la AEE: Una mirada práctica a la reconstrucción.

Análisis de riesgos ocupacionales en la instalación y operación de turbinas adaptables a postes de luz

Análisis de alturas ortométricas y derivadas en el caso de nivelación del 2018 en Vieques

Pervious concrete pavement to make a public plaza more handicap accessible and environmentally friendly



A Caribbean Business Power 100 Company
for Nationally and Internationally Recognized
Innovation, Quality, and Outstanding Work



1972

CARIBE TECNO

... your assurance that your Project will be built right on budget and on time.

www.caribetecno.com

Tel. (787) 781-4495 / info@caribetecno.com
PO Box 360099 San Juan 00936 PUERTO RICO



Ingeniería y Agrimensura

Dimensión

Año 33, Vol. 1

Dimension (Online)
ISSN 2167-7832

Dimension (Print)
ISSN 2155-1618

CONTENIDO

**COLEGIO DE INGENIEROS Y AGRIMENSORES
DE PUERTO RICO**

www.ciapr.org

JUNTA DE GOBIERNO 2018-2019

Comité Ejecutivo

Ing. Pablo Vázquez Ruiz, *Presidente*

Ing. Amarilys Rosario Ortiz, *Primer Vicepresidente*

Agrim. Marcos Colón Mercado, *Segundo Vicepresidente*

Ing. Carmen M. Figueroa Santiago, *Secretaria y Presidenta
Capítulo de Humacao*

Ing. Marilú De La Cruz Montañez, *Tesorera y Presidenta Instituto de
Ingenieros Civiles*

Ing. Miguel A. Bauzá Álvarez, *Auditor y Presidente Capítulo de San Juan*

Directores

Agrim. Ruth L. Trujillo Rodríguez, *Presidenta Instituto de Agrimensores*

Ing. Lorenzo R. Iglesias Vélez, *Presidente Instituto de Ingenieros Ambientales*

Ing. Jonathan J. Luna Cotto, *Presidente Instituto de Ingenieros de
Computadoras*

Ing. Faustino González Quiles, *Presidente Instituto de Ingenieros Electricistas*

Ing. Zelideth López Roldán, *Presidenta Instituto de Ingenieros Industriales*

Ing. Juan F. Alicea Flores, *Presidente Instituto de Ingenieros Mecánicos*

Ing. Yolanda Martínez Quesada, *Presidente Instituto de Ingenieros Químicos*

Ing. Melvin González González, *Presidente Capítulo de Aguadilla*

Ing. Krisia Ortiz Rivera, *Presidenta Capítulo de Arecibo*

Ing. Esther Maritza Zambrana Cruz, *Presidente Capítulo de Bayamón*

Ing. Jaime A. Plaza Velázquez, *Presidente Capítulo de Caguas*

Ing. Carlos R. Isaac Romero, *Presidente Capítulo de Carolina*

Ing. Carlos E. Maeda, *Presidente Capítulo de Florida*

Ing. Emilio Garay Vega, *Presidente Capítulo de Guayama*

Ing. María I. Crespo Lorenzo, *Presidenta Capítulo de Mayagüez*

Ing. Luis G. Rodríguez Fernández, *Presidente Capítulo de Ponce*

Ing. Ralph A. Kreil Rivera, *Expresidente*

Lcdo. Gilberto Oliver Vázquez, *Asesor Legal*

Ing. Erasto García Pérez, *Director Ejecutivo*

REVISTA DIMENSIÓN

Ing. Benjamín Colucci Ríos, *PhD, Editor*

Ing. Juan Carlos Rivera, *ME, Asistente de Editor*

Ing. Alberto M. Figueroa Medina, *PhD, Asistente de Editor*

Ing. Drianfel Vázquez Torres, *PhD, Asistente de Editor*

Ing. José Ramiro Rodríguez Perazza, *Redactor Especial*

Sr. Jay Chevako, *Producción*

Sra. Anne Chevako, *Dirección Editorial*

Sra. Beatriz Ramírez Betances, *Edición*

Mensaje del Presidente del CIAPR **4**

Mensaje del Presidente de la Junta Editora **5**

**Transformación del sistema eléctrico de la AEE:
Una mirada práctica a la reconstrucción.** **7**

Daniel Hernández Morales, PE, MEM

**Análisis de riesgos ocupacionales en la
instalación y operación de turbinas adaptables a
postes de luz** **13**

Kenneth J. Martínez-Torres, EIT, Jannette Pérez-Barbosa, PE

**Análisis de alturas ortométricas y derivadas:
Caso de nivelación del 2018 en Isabel Segunda,
isla municipio de Vieques, Puerto Rico** **19**

Javier Charón del Red Sísmica de Puerto Rico,
Departamento de Geología-Decanato de Artes y
Ciencias, y George Cole, Carlos Huerta y Linda L Vélez
del Departamento de Ingeniería Civil y Agrimensura-
Decanato de Ingeniería, UPR – RUM

**Pervious Concrete Pavement to Make a
Public Plaza More Handicap Accessible and
Environmentally Friendly** **27**

Sangchul S. Hwang, PhD, PE, Rafael Terán-Rondón, BSCE, Alesandra C. Morales-Vélez, PhD, EIT, Ruben Segarra-Montelala, BSCE, PE, Juanchi Somoza López, Iván W. Ruiz-Vale, BSCE, EIT, Efraín Daleccio, BSCE, PE

Diccionario Zurdo **37**

Año 33, Vol. 1, 2019

La revista oficial del Colegio de Ingenieros y Agrimensores de Puerto Rico (CIAPR), Dimensión, es publicada por el CIAPR de Puerto Rico. Las opiniones expresadas en el material sometido por los miembros del Colegio son la responsabilidad de sus autores individuales únicamente y las mismas no son necesariamente de Dimensión ni de su Junta Editora. Manuscritos para la revista pueden ser enviados a esta dirección: e-mail. dimension.ciapr@gmail.com. Tel. (787) 758-2250 Fax (787) 758-7639.

La revista Dimensión es producida por: Publishing Resources, Inc.: Ronald J. Chevako, Presidente y Principal Oficial Ejecutivo. Para información sobre ventas de anuncios comuníquese con Ronald Chevako (787) 647-9342.



MENSAJE DEL PRESIDENTE

Estimados lectores de Dimensión:

Reciban un afectuoso saludo del Colegio de Ingenieros y Agrimensores de Puerto Rico. Ciertamente nos complace poder presentarles una nueva edición de la Revista Dimensión con cuatro interesantes artículos de mucha pertinencia en el proceso que vivimos como país.

Nos encontramos en el umbral de un trascendental proceso de reconstrucción para el cual ha sido necesaria una etapa de planificación y preparación de 18 meses, tanto al sector gubernamental como al privado. La reconstrucción nos obligó a repensar cómo llevar a cabo las transformaciones hacia una reconstrucción resistente y resiliente.

El CIAPR ha estado en el centro de todo proceso clave de preparación para la reconstrucción de Puerto Rico. Hemos sido parte instrumental en la revisión del nuevo Código de Edificación de Puerto Rico (Puerto Rico Building Code 2018), el nuevo Reglamento Conjunto de Permisos y el desarrollo de la nueva Política Pública Energética y Marco Regulatorio para la Transformación del Sistema Eléctrico. La aportación del Colegio al gobierno y a la industria ha sido histórica y continuamos en el centro de toda esta dinámica, ahora asegurándonos de que nuestros ingenieros y agrimensores tengan la participación justa de las oportunidades que la reconstrucción representa.



Nuestra Expo Cumbre este 24 de mayo de 2019 reúne a los protagonistas de este proceso. Nuestros deponentes y recursos educativos nos traerán su perspectiva de cómo nuestros profesionales serán quienes vigilen por el interés ciudadano al construir un nuevo Puerto Rico. Es una oportunidad única para todos nuestros profesionales. Les invito a participar de toda la oferta educativa y a ser parte del servicio de excelencia que damos a nuestro pueblo los ingenieros y agrimensores. Continuemos todos **Unidos Transformando al Colegio** y a Puerto Rico.

Cordialmente.

Pablo Vázquez Ruiz, PE, MBA
Presidente

MENSAJE DEL PRESIDENTE DE LA JUNTA EDITORA

Un cordial saludo a todos los ingenieros y agrimensores del CIAPR. Esta primera edición del año 2019 contiene cuatro artículos de interés a nuestra matrícula.

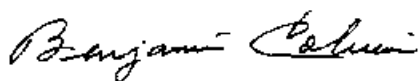
En el primer artículo, titulado *Transformación del sistema eléctrico de la Autoridad de Energía Eléctrica (AEE): Una mirada práctica a la reconstrucción*, el ingeniero Daniel Hernández Morales describe la condición actual de las áreas operacionales de la AEE y presenta recomendaciones de lo que los constituyentes deben esperar de dicha transformación de esta agencia administrativa en esta coyuntura histórica que atraviesa el país. Opina además, sobre la generación distribuida, el modelo de mini y microrredes, y concluye con el reto de la reconstrucción del sistema eléctrico de las islas municipios de Vieques y Culebra y el proyecto de reconstrucción total del sistema presentado ante la Agencia Federal para el Manejo de Emergencias (FEMA).

Pervious Concrete Pavement to Make a Public Plaza More Handicap Accessible and Environmentally Friendly: el Dr. Sangchul S. Hwang y demás autores presentan la dosificación óptima utilizada de hormigón permeable en una plaza universitaria. Describen además los beneficios del hormigón permeable desde el punto de vista de evitar empozamiento y mejores controles de la escorrentía mediante la infiltración del agua a través de esta tecnología innovadora de pavimento permeable.

Análisis de alturas ortométricas y derivadas -- Caso de nivelación del 2018 en Isabel Segunda: la profesora Linda L. Vélez y varios autores presentan las tareas relacionado a las nivelaciones de los controles de los mareógrafos que tiene bajo su responsabilidad la Universidad de Puerto Rico-Recinto Universitario de Mayagüez por conducto de la Red Sísmica de Puerto Rico. Como producto del análisis de la nivelación de una distancia de sobre 1,100 metros de recorrido desde el muelle, y sobre 16 horas de trabajo en el campo, se pudo comparar los resultados de dos tecnologías con las observaciones obtenidas de GNSS y las correspondientes a la nivelación diferencial con equipo geodésico en lo referente a las alturas ortométrica.

Análisis de riesgos ocupacionales en la instalación y operación de turbinas adaptables a postes de luz: Kenneth J. Martínez-Torres y Jannette Pérez-Barbosa nos presentan un procesamiento analítico y detallado y un análisis de seguridad por trabajo según la OSHA y el método desarrollado de dicho trabajo denominado *Five Check Point Evaluation* (FCE).

Agradezco la aportación de los profesionales ingenieros y agrimensores que colaboraron en esta edición de *Dimensión* y un especial agradecimiento a la estudiante Emily Silva Brenes y al personal del Centro de Transferencia de Tecnología en Transportación por su asistencia y asuntos administrativos asociados a esta edición. Espero que la selección de artículos técnicos en esta primera edición del 2019 sea de utilidad y beneficio para los lectores y profesionales de la ingeniería y agrimensura de Puerto Rico. Les exhorto a que también disfruten nuestra sección el Diccionario Zurdo y que accedan a la página electrónica del CIAPR, www.ciapr.org para que tengan acceso a las demás ediciones electrónicas. Los invito a contactarnos (benjamín.colucci1@upr.edu) con sus comentarios, o si conocen de algún recurso que desee someter un artículo que sea de interés a la matrícula de ingenieros y agrimensores de Puerto Rico.



Presidente, Junta Editora





DURASEAL ROOFING

DuraSealRoofing.com

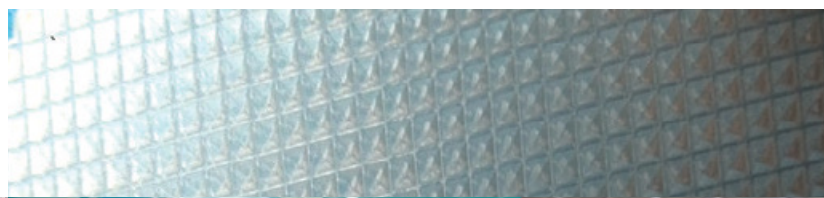
Waterproofing & Daylighting

Reliable - Professional - Responsible

+25 Years of Experience

Environmentally Conscious

100% Customer Satisfaction



+ 25 Year Roofs

Many roofs with FiberTite performed flawlessly during the last hurricane season. Some of which had +25 years of service. Contact us for more details

Savings +33%

Our Sunoptics Skylights have successfully delivered an average of 33% in monthly energy savings to business owners with a typical ROI of 3 years. Furthermore, our skylights are MARIA PROOF. Contact us to learn more.

wendy@durasealroofing.com

787.360.0306

TRANSFORMACIÓN DEL SISTEMA ELÉCTRICO DE LA AEE: UNA MIRADA PRÁCTICA A LA RECONSTRUCCIÓN

Daniel Hernández Morales, PE, MEM

La Autoridad de Energía Eléctrica (AEE) será transformada en su modelo de negocio, transfiriendo toda la operación y mantenimiento de los sistemas de transmisión y distribución, entre otras responsabilidades, al sector privado, mediante un operador o concesionario. Simultáneamente, todo el sistema eléctrico actual deberá experimentar una gran reconstrucción, con toda probabilidad la mayor en la historia de sistema eléctrico alguno.

Mucho se comenta sobre la tan deseada reconstrucción y transformación del sistema eléctrico; no obstante, las discusiones permanecen en niveles muy abstractos, donde se describe un nuevo sistema eficiente, robusto, moderno y resistente. Un sistema enfocado en los clientes, que aporte a un ambiente limpio de contaminación, con altas eficiencias y economías. Sin embargo, estas discusiones no profundizan en cómo se traducen estas buenas ideas o conceptos de alto nivel en una visión clara de lo que realmente falta por hacer y cómo se ejecuta una transformación de esta naturaleza de manera ordenada.

Como dice un amigo y mentor, para hablar del *niti-griti* de la transformación, es necesario tener claro dos aspectos básicos: conocer en detalle la operación del sistema eléctrico actual, sus características, deficiencias, virtudes y oportunidades de mejoramiento continuo; y en segundo lugar, saber hacia dónde dirigir los esfuerzos y recursos para alcanzar las metas deseadas considerando las expectativas de los clientes. El sistema eléctrico deberá experimentar cambios dramáticos en sus tres áreas principales: generación, transmisión y distribución.

En este artículo describo la condición actual de cada una de las áreas operacionales y qué debemos esperar de la transformación.

SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA

Descripción del sistema actual y primer problema a atender: Reemplazo de equipos en obsolescencia

El sistema de distribución eléctrica, de donde se sirven principalmente los clientes residenciales y comercios, cuenta con más de 31,000 millas de líneas, de las cuales el 3% son soterradas. La AEE distribuye energía eléctrica a distintos niveles de voltaje que van en el rango de 4,160 voltios hasta 13,200 voltios. Además, el sistema tiene en operación más de 350 subestaciones, que son aquellas instalaciones donde se interconecta el sistema de transmisión con el sistema de distribución. Cada subestación eléctrica se compone de elementos básicos como lo son transformadores de potencia, que utilizamos para bajar el alto voltaje de las líneas de

transmisión a niveles de voltaje en los que se hace más práctica y manejable la distribución eléctrica. El sistema eléctrico tiene sobre 550 de estos transformadores en servicio, de los cuales más del 50% exceden su vida útil de 30 años, lo que resta confiabilidad al sistema. Otro equipo básico en las subestaciones son los interruptores o *breakers* de alto voltaje que se utilizan para conectar y desconectar líneas o equipos del resto del sistema eléctrico, en especial cuando ocurren averías que puedan poner en riesgo la vida humana y la estabilidad del sistema. La AEE tiene en operación aproximadamente 2,547 interruptores de alto voltaje de los cuales 1,430 se utilizan en el sistema de distribución. La mayor parte de éstos son de distintas tecnologías y de gran cantidad de diferentes fabricantes, lo que dificulta y encarece, sin lugar a dudas, el manejo de piezas de repuesto y la administración de los almacenes. Muchos de estos equipos tienen más de 40 años en servicio, lo que excede su vida útil y le resta confiabilidad al sistema eléctrico.

Otro aspecto importante es el sistema de protección eléctrica que se utiliza para detectar fallas eléctricas en líneas, transformadores y generadores, entre otros, cuando estos presentan alguna avería. El 90% del sistema de protección eléctrica actual está compuesto por equipos manufacturados con tecnología electromecánica, muchos de estos con más de 50 años de servicio. Esta tecnología no registra información importante sobre las averías, lo que resulta imprescindible para detectar, identificar y analizar eventos que ocurren en el sistema eléctrico en corto tiempo, tal y como se logra con los sistemas de protección eléctrica modernos.

El reemplazo agresivo de todos estos equipos que han excedido su vida útil y que forman parte del sistema de distribución, deberá ser prioridad en la ejecución del plan de la reconstrucción. Esto mejorará dramáticamente la confiabilidad, estabilidad y calidad del servicio a los clientes.

Problemas o deficiencias operacionales del sistema de distribución

El desempeño de una empresa que distribuye energía eléctrica se mide, en parte, por la cantidad de interrupciones que sufre el cliente y la duración de cada evento. El sistema de distribución es el más extenso en términos de millas de líneas y cantidad de equipos conectados. La mayoría de las averías de la red se presentan en este sistema y las razones pueden ser muchas; contacto eléctrico con vegetación, contacto eléctrico con animales, fallas en los equipos de las subestaciones o en los equipos conectados a las líneas de distribución. La interrupción del servicio

eléctrico también puede ocurrir si perdemos la línea de transmisión que energiza la subestación y representa su única fuente de generación.

El sistema de distribución eléctrica, como se conoce hoy en la AEE, es radial. Esto quiere decir, que cada subestación del sistema eléctrico opera de manera aislada. Si ocurre una avería permanente en una línea de distribución, todos los clientes de esa línea se quedan sin servicio hasta tanto se repare la avería, o se transfieran manualmente los clientes a otras subestaciones lo que aumenta el tiempo de la interrupción.

Otro problema que presenta el sistema actual de distribución son los llamados *bolsillos* o pequeños sectores que pierden el servicio y no son detectados de manera automática por el sistema remoto de la AEE. No es hasta que estos clientes se comunican con el personal de servicio al cliente que la AEE entra en conocimiento y envía personal a reparar la avería, lo que muchas veces resulta en interrupciones prolongadas.

¿Qué podemos hacer para mejorar o modernizar el sistema de distribución?

El nuevo sistema de distribución se debe basar en lo que la industria se conoce como redes inteligentes o *Smart Grid*, como se conoce en inglés, donde la comunicación entre la mayoría de los equipos permite la automatización de las operaciones. Este moderno concepto facilita que los equipos conectados a la red de distribución, tales como: interruptores, desconectivos (*switches*), subestaciones, equipos de protección eléctrica, entre otros, se integren mediante una red de comunicación que facilita las funciones de control, medición y protección del sistema eléctrico de forma automática. Cuando se presenta una avería en una red inteligente, el sistema aísla o desconecta el segmento de línea que presenta la avería y automáticamente transfiere la mayor parte de los clientes a otra línea de distribución eléctrica o a otra subestación. El resultado de esta operación automática es una disminución en el tiempo total de la interrupción al cliente. Claro está, esto requiere de un plan inicial de reemplazo agresivo de equipos en obsolescencia (transformadores de potencia, subestaciones, interruptores y sistemas de protección eléctrica) por tecnología moderna que viabilice la implementación de sistemas de redes inteligentes. Además, el reemplazo de estos equipos disminuirá las interrupciones asociadas a fallas debido al deterioro natural que producen los años de operación y a la corrosión acelerada de sus componentes.

Otro aspecto interesante de las redes inteligentes es que nos permitirá instalar a cada cliente un medidor o metro inteligente con capacidad de enviar información actualizada del consumo, lo que facilitará identificar de manera inmediata cuáles clientes se encuentran sin servicio, entre otros aspectos. Esto haría cosa del pasado el problema de cómo detectar los bolsillos, ya que todos los medidores estarán conectados al sistema remoto de la AEE. Con este sistema, la AEE tendría la oportunidad de enviar mensajes a los clientes cada vez que tengan una interrupción del servicio en su hogar o negocio y para informarles cuándo se restablecería.

Para atender el problema de interrupciones de servicio debido a la pérdida o fallas en una línea de transmisión que sirve de fuente de energía a la subestación, se considera la integración de generación distribuida conectada a líneas del sistema de distribución, como lo son las placas solares de alto grado de utilización, almacenamiento de energía con baterías, generadores convencionales y otros sistemas que puedan servir a los clientes de forma aislada del resto del sistema eléctrico. Esto es básicamente lo que perseguimos cuando hablamos de los sistemas de mini-redes o micro-redes. La intención es que el sistema de distribución tenga fuentes alternas de generación que puedan mantener el servicio eléctrico a sus clientes, haciendo énfasis en cargas importantes como lo son hospitales, bombas de la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados (AAA), comercios, oficinas gubernamentales e infraestructura de comunicaciones, entre otros, cuando la red principal de la AEE se interrumpa por averías o disturbios atmosféricos.

El nuevo sistema de distribución incluirá la aplicación de nuevos códigos y estándares para la construcción de líneas y subestaciones, entre otros. Se utilizará un solo nivel de voltaje para la distribución eléctrica (13,200 V), lo que simplificará la operación y mantenimiento del sistema. La mayor parte de las subestaciones se deberán reconstruir utilizando tecnología aislada por gas (gas SF-6), la cual ofrece muchas ventajas sobre la tecnología actual (ver fig 1). Este tipo de subestación requiere un menor espacio de terreno para su construcción (hasta un 75% menos), brinda mayor confiabilidad y seguridad, su construcción es encapsulada en un 100%, esto significa, que no hay partes energizadas expuestas al medio ambiente, lo que brinda protección contra disturbios atmosféricos y evita el hurto de cobre. Además, estas subestaciones no requieren mantenimiento por tiempo que puede exceder los 20 años y todos sus equipos son operados remotamente, lo que minimiza el tiempo para ejecutar muchas de las operaciones que en la actualidad se llevan a cabo manualmente. En la AEE tenemos en operación un número limitado de estas subestaciones y podemos dar fe de su conveniencia en la transformación que buscamos para el sistema eléctrico.



Fig. 1a: Una subestación convencional.

*Alvin Báez/PREPA



Fig.1 b Una subestación con tecnología aislada por gas (Gas Insulated Substation)."

SISTEMA DE TRANSMISIÓN

Descripción, condiciones operacionales y soluciones

El sistema de transmisión de la AEE se compone de aproximadamente 2,490 millas de líneas conectadas a los siguientes niveles de voltajes: 230,000 V, 115,000 V y 38,000 voltios. Además, tiene instalados 1,117 interruptores de alto voltaje, de los cuales el 39% exceden su vida útil y requieren de reemplazo por obsolescencia. Las líneas principales de transmisión, conectan o sirven de enlace entre los sistemas de generación y distribución. Una característica del sistema eléctrico de la AEE es que la mayor parte de la generación se produce en el sur de Puerto Rico; sin embargo, la mayoría de las subestaciones que suplen el servicio a los clientes se encuentran en el área norte de la isla. Las líneas de transmisión que conectan la generación producida en el área sur con las subestaciones del norte discurren principalmente a través de las montañas, donde resulta muy difícil acceder con prontitud cuando ocurren averías. Esta condición resulta en reparaciones que toman un tiempo considerable, ya que requieren la utilización de helicópteros para transportar equipo y personal. El nuevo sistema de transmisión atenderá esta situación relocalizando las líneas principales de transmisión en rutas cercanas a carreteras, lo que permitirá el rápido acceso a los camiones, equipo y personal, de manera que la reparación de las averías se realice en un menor tiempo.

Con los nuevos estándares y códigos se deberá reforzar la instalación de postes y estructuras de las líneas de transmisión para que resistan vientos de huracanes de categoría 5 con vientos sostenidos de 150 millas por hora. Esta iniciativa disminuirá el daño a la red de transmisión y permitirá que el sistema de generación se restablezca en corto tiempo.

Una condición que actualmente tienen las líneas de transmisión es su limitación en capacidad operacional para transferir mayor cantidad de generación, debido a problemas asociados al control de vegetación. Típicamente,

la AEE opera sus líneas a menor capacidad de las que estas están diseñadas, para evitar que la elongación (estiramiento natural que se produce en el metal de la línea producido por el calor que genera la corriente que fluye por el cable) de la línea haga contacto con la vegetación o árboles que se encuentren cerca de la misma. La reconstrucción debe incluir sistemas de información que permitirán operar las líneas a mayor capacidad tomando en cuenta los programas de control de vegetación. De esta manera, podremos utilizar al máximo la capacidad de las líneas, lo que podría evitar o minimizar las interrupciones de servicio por relevos de carga.

SISTEMA DE GENERACIÓN

Descripción y transformación

El sistema de generación actual de la AEE tiene una capacidad instalada de 6,091 millones de vatios (Megavatios=MW) de los cuales 961 MW los producen las co-generadoras Ecoeléctrica y AES, 253 MW en generación renovable (solar y viento) de compañías privadas y 4,877 MW de unidades de generación de la AEE. La flota de generación de la Autoridad consiste de las centrales principales de generación base (generación principal) que son: Palo Seco, San Juan, Aguirre, Costa Sur y las centrales hidroeléctricas. Además, la AEE tiene generación de reserva para cubrir situaciones de deficiencia en generación base, que incluyen 378 MW en unidades de respuesta rápida para picos de demanda (*peaking units*) distribuidas en localidades estratégicas. Como parte de esta reserva, cuenta con 220 MW en la Central Mayagüez, 247 MW en la Central Cambalache y 592 MW en el Ciclo Combinado de Aguirre. La mayor parte de la generación base se produce en las centrales Costa Sur, Aguirre y las co-generadoras AES y Ecoeléctrica, todas localizadas al sur de Puerto Rico. No obstante, el 70% de la carga total de la AEE, aproximadamente 1,700 MW, se utiliza para servir a los clientes del área metropolitana. Actualmente, la generación disponible en las centrales del norte, San Juan y Palo Seco es de aproximadamente 970 MW, lo que significa que un 43% de la generación requerida en la zona metro la importamos de las centrales del sur. Esta deficiencia de generación en el norte hace vulnerable el sistema ante averías en las líneas de transmisión que, muchas veces, producen relevos de carga automáticos donde se interrumpe el servicio a miles de clientes para estabilizar el sistema de generación. De aquí la importancia de aumentar la capacidad generatriz en el norte de la isla, instalando nueva generación base con capacidad suficiente para cubrir la demanda de la zona metro.

En términos de utilización de combustible, la producción de generación en la flota que sirve a la isla se distribuye aproximadamente de la siguiente manera: 19% en combustible número 6 (bunker C), 13% en destilado liviano (diésel), 23% en gas natural (en centrales de la AEE), 20% en gas natural (EcoEléctrica), 21% en carbón (AES), 2% en renovables y 0.1% en hidroeléctrica. A corto

plazo, la transformación de la utilización del combustible en nuestras unidades comenzará con la conversión a gas natural de las unidades 5 y 6 de la Central San Juan. Estas unidades, consumen alrededor de un 70% del combustible diésel que compra la Autoridad, mucho más costoso que el gas natural, y puede representar ahorros anuales de sobre \$150 millones en compra de combustible. Otro proyecto de cambio de combustible a corto plazo es la conversión a gas natural de la Central Mayagüez. Este importante proyecto tiene doble propósito, reemplazar el combustible que utiliza la central y cambiar el uso que se le da a esos generadores. La Central Mayagüez tiene una capacidad de 220 MW (suficiente para servir el área oeste) y actualmente se utiliza como generación de reserva; se activa sólo cuando existe alguna deficiencia en la generación base, debido al alto costo del combustible que usa (diésel). El plan es operar esta central como generación base, lo que implica que podrá reemplazar 220 MW que en la actualidad se generan con combustible bunker C en las centrales termoeléctricas de la AEE. Este cambio operacional podrá proveer ahorros de sobre \$50 millones anuales en compra de combustible y servirá como una fuente de menor contaminación al medioambiente. Además, este proyecto se presenta como un abanico de oportunidades para el desarrollo económico del área oeste que junto a las iniciativas para mejorar el sistema de distribución, aumentará la confiabilidad y estabilidad del sistema en esa área. Los municipios de Mayagüez, Cabo Rojo, Lajas, Hormigueros, Añasco, San Germán, Sabana Grande, entre otros, que dependen principalmente de las líneas de transmisión que provienen de la Central Costa Sur, se beneficiarán grandemente de este proyecto.

El futuro de la flota de generación se regirá por el marco regulatorio energético y el Negociado de Energía, que regularán la integración de nuevas fuentes de generación y por el Plan Integrado de Recursos que establecerá una ruta científica a la transformación del sistema eléctrico. La transición ordenada hacia un sistema principalmente dependiente de fuentes renovables utilizará como fase inicial la disminución dramática del uso de Bunker C y del destilado liviano (diésel), los cuales serán reemplazados por gas natural. Este cambio ofrecerá a corto plazo una reducción considerable del costo energético por concepto de compra de combustible, menor contaminación al ambiente y ahorros en el mantenimiento a los generadores.

Para poder integrar grandes bloques de generación renovable es necesario que se instalen sistemas de almacenamiento de energía con baterías que sirvan para controlar las continuas variaciones características de los sistemas renovables. Otras iniciativas incluyen generación convencional como lo son ciclos combinados y la rehabilitación de las plantas hidroeléctricas que proveerán recursos de flexibilidad dentro del sistema eléctrico para mantener las operaciones, respuestas de demanda y almacenamiento. La flexibilidad de las plantas se puede lograr considerando varios aspectos como lo son: la capacidad de arranque (*start*

up) y apague (*shut down*) en cortos períodos de tiempo, operar con una carga baja o mínima, cambiar rápidamente el nivel de generación (*generation output*) y ofrecer servicios auxiliares de control de frecuencia y reserva de rotación, entre otros.

La calidad del sistema eléctrico se mide en términos de cuan estables y continuos se pueden mantener los parámetros básicos de la señal eléctrica que le llega al cliente como lo son el nivel de voltaje (evitar los altos y bajos voltajes), así como las variaciones en la frecuencia base de 60 Hertz (ciclos por segundo). La ausencia de estabilidad en los parámetros básicos puede resultar en daños a los equipos eléctricos de los clientes y la interrupción de procesos industriales que requieren de alta precisión como lo es la manufactura de productos medicinales, entre muchos otros. Un reclamo del sector industrial ha sido que se mejore la calidad de la señal, conocido en inglés como *Power Quality*. El nuevo sistema eléctrico incluirá elementos que ayuden a mantener la calidad de la señal de los clientes industriales, comerciales y residenciales. En la industria eléctrica este tipo de problema se atiende instalando equipos en las líneas de transmisión, distribución y subestaciones que permiten monitorear y controlar la calidad de la señal.

Generación distribuida

Una cantidad considerable de la demanda energética de Puerto Rico se espera que se supla mediante la instalación de generadores independientes (privados) que utilicen fuentes de energía renovable, principalmente de energía eólica y fotovoltaica. En la industria eléctrica, a este tipo de generación se le conoce como Generación Distribuida (GD) o Generación Dispersa (GD) y en términos generales se refiere a cualquier tipo de generador eléctrico o inversor estático que produce corriente alterna y tiene la capacidad de operar en paralelo con el sistema de la empresa, en nuestro caso con el sistema eléctrico de la Autoridad.

La Generación Distribuida incluye generación eléctrica proveniente de equipos con diferentes tipos de tecnologías que utilizan combustibles fósiles (petróleo o gas) o fuentes renovables (sol, viento, etc) tales como: Generadores Sincrónicos, Generadores de Inducción (generadores de energía eólica) y Generadores Asincrónicos (generadores de energía fotovoltaica), entre otros. La tendencia a nivel mundial es que las empresas eléctricas se muevan del sistema tradicional de generación centralizada a generación dispersa. La figura 2 muestra el arreglo típico de un sistema eléctrico tradicional, donde la generación es producida desde grandes centrales generatrices conectadas a la red de transmisión y, en la mayoría de los casos, muy distantes de las cargas. Además, se muestra, de manera simplificada, lo que deberá ser un sistema eléctrico moderno con generación dispersa, donde generadores de menor tamaño se interconectan al sistema eléctrico, cerca del área de las cargas, para suplir parte de la demanda energética.

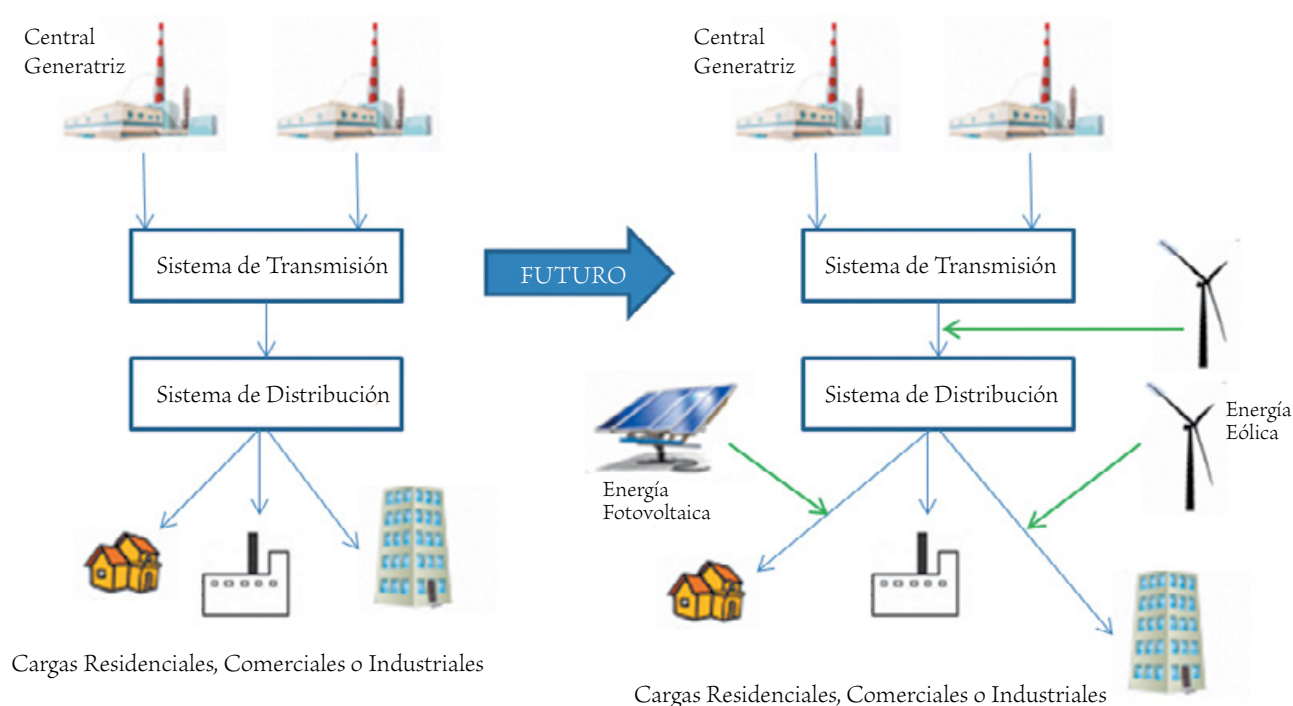


Fig. 2 Sistemas Eléctricos de Generación Centralizada y Distribuida

La operación de éstos, en paralelo con la empresa eléctrica, representa un reto técnico en la forma de operar y proteger el sistema eléctrico. Por un lado, el dueño operador de un GD debe asegurarse que su generador se desconecte por condiciones anormales o no deseadas que se presenten en el sistema eléctrico y, de otro lado, la responsabilidad de la empresa eléctrica (en nuestro caso la AEE) de evitar que el generador independiente afecte la calidad del servicio que suplente a sus clientes, para quienes es transparente de dónde proviene el servicio que reciben.

Miniredes y Microrredes

La visión es que el sistema eléctrico de la AEE pueda estar dividido en 8 mini redes que tengan la capacidad de operar de manera aislada (modo isla) bajo escenarios de emergencia o cuando perdemos la generación principal del sistema. Además, bajo condiciones normales, las mini redes operarán como un sistema integrado, donde la generación base del sistema suplirá todas las cargas de los clientes. Estas utilizarán el sistema de transmisión y distribución necesario para suplir la generación de las cargas que se consideren críticas dentro de los municipios que conformen la mini red. La generación instalada en cada mini red estará conectada a la red de transmisión para energizar las distintas subestaciones de cada municipio. En cada mini red se deben construir sistemas soterrados e infraestructura bajo nuevos estándares y códigos que consideren protección contra huracanes de categoría, 5 de manera que a los clientes que representen las cargas

críticas se les pueda restablecer el servicio en corto tiempo.

Las microrredes son sistemas eléctricos más pequeños, donde se conecta generación de menor capacidad centralizada en un área con menos clientes. Luego del Huracán María, y con la ayuda de FEMA y el Cuerpo de Ingenieros, la AEE instaló varias microrredes conectando generadores móviles directamente en varias subestaciones en distintos municipios tales como: Arecibo, Lares, Villalba, Maunabo, Patillas, Yabucoa, Naguabo, Vieques y Culebra. De esta forma, se pudo reestablecer el servicio parcialmente a las cargas importantes como hospitales y sistemas de bombeo conectados a esas subestaciones. La AEE debe contemplar, en su plan de reconstrucción, adquirir una flota de estos generadores móviles para proveer el servicio en áreas que hayan quedado sin servicio dentro de las mini redes. Además, estos generadores móviles podrán ser utilizados para mantener el servicio a los clientes durante la reconstrucción de una cantidad considerable de subestaciones y equipos que requieren su reemplazo por obsolescencia.

Vieques y Culebra

Uno de los proyectos más emblemáticos deberá ser la reconstrucción del sistema eléctrico de las islas municipio de Vieques y Culebra. La AEE presentó ante la Agencia Federal para el Manejo de Emergencias (FEMA en inglés) dos proyectos separados para evaluación, dentro de los distintos programas de mitigación que esta agencia provee. El primero consiste en una microrred compuesta de generación

renovable (solar) que operará en conjunto con un sistema de almacenamiento de energía con baterías y generación convencional. Este sistema tendrá la capacidad de producir el 100% de la electricidad que ambas islas consumen. Además, podrá operar en modo de isla; esto es, totalmente desconectado de la red principal de la AEE. También tendrá la capacidad de operar en paralelo a la red principal utilizando la línea de transmisión actual que discurre desde el Municipio de Naguabo y que representa la fuente de generación principal para ambas islas.

El segundo proyecto presentado ante la FEMA es la reconstrucción total del sistema de distribución de ambas islas, conforme a los nuevos códigos y estándares de construcción. Este proyecto incluye la construcción de todas las líneas de distribución utilizando un nuevo nivel de voltaje de 13,200, el reemplazo de la subestación existente con tecnología encapsulada en gas, automatización de las operaciones, basado en la red inteligente, instalación de metros inteligentes para todos los clientes, iluminación *led* en los postes, soterrado de líneas de las cargas críticas, entre otros. Luego de la reconstrucción, las islas municipio tendrán tres posibles fuentes de generación: la línea existente de transmisión, la microrred y los generadores convencionales. Ambos proyectos tienen un costo estimado en conjunto de \$400 millones y un tiempo de ejecución de aproximadamente 2 años.

Conclusión

Se estima que el costo de todas estas iniciativas exceda los 20 billones de dólares, cuyo financiamiento deberá provenir de una combinación de fondos federales, inversión privada y fondos propios de la AEE. La reconstrucción se llevará a cabo en un periodo de aproximadamente 10 años, donde se le dará prioridad al reemplazo de la flota de generación hacia fuentes principalmente renovables, teniendo como fase inicial el cambio de combustible actual a gas natural como plan de transición hacia dichas fuentes renovables. Entre los primeros dos proyectos de conversión a gas natural, unidades 5 y 6 en la Central San Juan y la Central Mayagüez, se estima un ahorro conjunto en compra de combustible y mantenimiento que podría exceder los \$200 millones anuales.

La reconstrucción del sistema deberá tener como prioridad un plan agresivo de reemplazo de equipo en obsolescencia como lo son subestaciones, transformadores de potencia, interruptores de alto voltaje y sistemas de protección eléctrica, entre otros. La implementación ordenada y bien planificada de las distintas iniciativas para mejorar los sistemas de generación, transmisión y distribución es lo que transformará nuestra red eléctrica a una resistente, moderna y confiable para beneficio de todos los clientes y el desarrollo económico de Puerto Rico.



NOTAS BIOGRÁFICAS

El ingeniero Daniel Hernández Morales trabaja para la Autoridad de Energía Eléctrica, donde actualmente ocupa el puesto de Director de Generación. El ingeniero Hernández Morales tiene bajo su responsabilidad la operación y mantenimiento de toda la flota de generación base que incluye las centrales: Palo Seco, San Juan, Aguirre, Costa Sur y centrales Hidroeléctricas. Tiene a su cargo la generación de reserva compuesta por: Central Mayagüez, Central Cambalache, Ciclo Combinado de Aguirre, y las unidades de respuesta rápida o *peaking units*. También, le responde la División de Riego, Represas y Embalses. Anteriormente, ocupó el puesto de Jefe de División de Conservación Eléctrica y Protección del Sistema Eléctrico, donde administró los departamentos que conducen el programa

de mantenimiento eléctrico en subestaciones, transformadores, generadores, interruptores o *breakers* y sistemas de protección eléctrica que sirven a las áreas de transmisión, distribución y generación.

El ingeniero Hernández Morales dirigió el Departamento de Pruebas de Aceptación, a cargo de las pruebas eléctricas requeridas a los equipos nuevos que pasan a formar parte del sistema eléctrico, donde colaboró en el desarrollo de métodos y técnicas para validar e implementar nuevas tecnologías. Ha tenido a su cargo proyectos de gran envergadura como lo son: la revisión del diseño de protección y los protocolos de pruebas para la puesta en servicio de las unidades generatrices 5 y 6 (ciclos combinados con capacidad neta de 232 MW cada una) de la Central San Juan, así como la supervisión de la puesta en servicio de subestaciones aisladas por gas (GIS en inglés), entre otros proyectos que abarcan los sistemas de Generación, Transmisión y Distribución. Participa como instructor en el Centro de Adiestramiento de Distribución Eléctrica y en el Centro de Adiestramiento del Sistema Eléctrico de la AEE, ofreciendo cursos en temas relacionados con Protección de Sistemas Eléctricos. Es graduado de la Universidad de Puerto Rico, Colegio Regional de Bayamón, donde completó con alto honor un Bachillerato en Tecnología Electrónica y de la Universidad Politécnica, donde completó, con alto honor, un Bachillerato en Ingeniería Eléctrica y una Maestría en Ingeniería Gerencial con énfasis en Protección Ambiental. Es autor de otros artículos relacionados con temas de Protección, Pruebas de Aceptación y La Filosofía de Calidad Total (*Total Quality Management*) aplicada al Departamento de Pruebas de Aceptación. Dirección electrónica del autor daniel1616pr@yahoo.com / da-hernandez@prepa.com.

ANÁLISIS DE RIESGOS OCUPACIONALES EN LA INSTALACIÓN Y OPERACIÓN DE TURBINAS ADAPTABLES A POSTES DE LUZ

Kenneth J. Martínez-Torres, EIT, Jannette Pérez-Barbosa, PE

RESUMEN

Trabajar con sistemas energéticos de hélices implica distintos riesgos dentro de las etapas de instalación, operación y mantenimiento. Por tanto, la importancia del factor humano en los proyectos se debe enfatizar en el esfuerzo de utilizar energía renovable en los sectores. En este estudio el sistema de interés consta de una turbina eólica vertical a pequeña escala, destinada a servir como fuente de voltaje para un poste de luz. Uno de los objetivos del estudio fue determinar los factores de riesgo y los peligros asociados a aquellas actividades durante el ciclo de vida de dicha turbina eólica. Encontrar las alternativas para prevenir los accidentes cuenta con una exploración en las estadísticas y la aplicación de técnicas de gestión de riesgos, como lo son el análisis de seguridad por trabajo (o JSA, por sus siglas en inglés) y la evaluación de los cinco cotejos (o FCE, por sus siglas en inglés).

ABSTRACT

Working with propeller power systems involves different risks within the installation, operation and maintenance stages. Therefore, the importance of the human factor in projects should be emphasized in the effort to utilize renewable energy in sectors. In this study, the system of interest consists of a small-scale vertical wind turbine, designed to serve as a voltage source for a light pole. One of the objectives of the study was to determine the risk factors and the hazards associated with those activities during the life cycle of such a wind turbine. Finding alternatives to prevent accidents includes an exploration of statistics and the application of risk management techniques, such as Job Safety Analysis (JSA) and the Five Checkpoint Evaluation (FCE).

PALABRAS CLAVES: Manejo de riesgos, seguridad ocupacional, energía eólica

INTRODUCCIÓN

En décadas recientes, ha habido un apreciable auge en la industria eólica a nivel mundial debido a la necesidad de disminuir la contaminación y los costos de generar electricidad. La energía eólica en los Estados Unidos ahora representa aproximadamente el 18% de la totalidad de electricidad proporcionada en el mundo, seguido por China, el cual suministra un 32% de ese monto [9]: un cúmulo de electricidad para nutrir millones de hogares y crear miles de empleos. China tuvo un crecimiento anual de 22% de su mercado, con una instalación de 63.013 MW en 2015. Ahora hay 16 países europeos con más de 1.000 MW instalados y otros 9 países

con más de 5.000 MW, siendo Alemania el líder en el mercado europeo con 6.013 MW de nuevas instalaciones [2].

También se agregó nueva energía eólica en los países de Panamá, Honduras, Guatemala, Argentina, Costa Rica y Chile, abarcando los sectores de Centro y Sur América. Además, Brasil alcanzó una capacidad acumulada de 8.7 GW y Uruguay casi funciona completamente con energía renovable. La industria de la energía eólica promete seguir evolucionando en el futuro inmediato, puesto que el rendimiento de varios países alcanza duramente el 5% de la cabalidad de la demanda energética [3]. Sin embargo, a medida que el negocio de la energía eólica florece con determinado aplomo, muchos accidentes internacionales se han compilado y categorizado en informes especiales de ojo privilegiado, en busca de mejoras de prevención y gestión de riesgos.

Inicialmente, en 2013, se documentaron los siguientes riesgos laborales relacionados con turbinas eólicas hechas a grande escala. Estos riesgos podrían ser agravados según la localización de la turbina (si está instalada en suelo o mar) y su escala [4]: riesgos de transporte por carretera, riesgos de relocalización de trabajadores, riesgos de ensamblaje de la turbina, riesgos de rescate y riesgos de mantenimiento y reparación.

Más adelante, en 2015, una organización de Canadá analizó los datos de distintos foros y extrajo las siguientes conclusiones: un total de 287 obreros fueron víctimas en 148 accidentes y la mayoría de éstos fueron lesionados mientras realizaban tareas soporíferas de mantenimiento. Descubrieron que ocurrían caídas en tierra y mar, pero las sucedidas en tierra ocupan el primer lugar en muertes. Por lo tanto, las caídas son los incidentes más frecuentes y marcan un 16% de todos los accidentes [1].

Durante el mes de diciembre del 2018, se actualizaron unos datos concernientes al número de accidentes e incidentes ocurridos con turbinas eólicas desde el año 1984, en distintos países, como Inglaterra, Australia y Alemania. El compilador de dichos datos es anónimo y presenta las referencias de dónde fueron publicados estos casos. Los casos de fatalidades o muertes que ocurrieron en el ínterin representan un 5.9% de la suma de todos los casos reportados, que son más de dos mil informes, mientras que las lesiones humanas representan un 6.9%. Es decir, los accidentes que comprometieron la vida de un obrero rebasan el 10% de los infortunios acaecidos en más de tres décadas. La tabla 1 revela más detalles:

Tabla 1. *Compilación mundial de casos reportados desde el 1984 hasta 2018*

Incidente	Frecuencia	Porcentaje
Daños misceláneos	447	19.0%
Fallo por hélices	394	16.8%
Daños por fuego	342	14.6%
Daños ambientales	240	10.2%
Fallo por estructura	202	8.6%
Accidentes de transporte	199	8.5%
Lesiones	162	6.9%
Daños a la salud humana	144	6.1%
Fatalidades	139	5.9%
Otros	79	3.4%
Total	2,348	1

El término “misceláneo” se emplea para referirse a un tipo de peligro que también amenaza al jornalero, pero también afecta sus alrededores y los sistemas que son necesarios para mantener la turbina funcionando. Además, es meritorio aclarar que esta suma de casos no apunta a un tipo específico de turbina hecha a grande escala, sino a un conjunto de diversas marcas, de clases horizontales y verticales y de diferentes potencias.

Sin embargo, un borrador de autor anónimo sugiere que las turbinas hechas a pequeña escala (en especial las que rinden una potencia de 100 kW o menos y su poste no excede de 140 ft de alto) posan los siguientes riesgos: riesgos de climas extremos, riesgos de ataque de insectos y animales, riesgos de oscuridad, riesgos de equipos de construcción o instalación, riesgos de equipos mecánicos, riesgos de equipos eléctricos, riesgos de objetos en caída libre y riesgos de falta de comunicación [7].

PROCESAMIENTO ANALÍTICO

Todos los riesgos existentes en un área de trabajo, no tan sólo los que impactan al trabajador, tienen que atravesar un proceso de priorización. Esto ayudará a dedicar la atención a asuntos urgentes y dirigir los recursos esenciales para hacer mermar la ocurrencia de los peligros mayores. Partiendo de la premisa que los accidentes tienen una probabilidad P_i de ocurrir y una consecuencia o un efecto E_i , cada situación de seguridad puede ser ubicada en un renglón justo de importancia. Los accidentes individuales, en adición, pueden ser analizados desde la perspectiva de una secuencia o un historial de probabilidades; en otras palabras, el mismo accidente no tuvo el mismo nivel de ocurrencia este año como lo tuvo el año pasado, y puede ser igualmente que sus efectos fueron peores el término pasado o fueron livianos.

Como se puede dar la oportunidad de trabajar con dos o más probabilidades y efectos para el mismo caso de interés, entonces se puede expresar que el riesgo en general (RG) es la adición de todos los productos de (P_i) y (E_i) en una dada secuencia de N casos:

$$RG = \sum_{i=1}^N P_i E_i$$

Acto seguido, procede evaluar las áreas riesgosas en el ambiente de trabajo. En este estudio se discuten dos evaluaciones.

OSHA, la agencia de salud y seguridad de Estados Unidos, revisó en 2002 un folleto en el que se estudia el concepto de análisis de seguridad en el trabajo y se discuten unos ejemplos. Job Safety Analysis (JSA) se concentra técnicamente en la relación entre el trabajador, la tarea, las herramientas y el entorno de trabajo. Después de identificar aquellos peligros potenciales y no controlados se tomará una serie de pasos para eliminarlos o reducirlos a un nivel de riesgo no alarmante.

Análisis de seguridad por trabajo

Un JSA, según OSHA, puede ser implementado en múltiples lugares de trabajo, donde se efectúan los trabajos de mayúsculas tasas de lesiones o males, los trabajos con el potencial de causar afecciones graves e incapacidades, los trabajos en los que un simple error humano podría provocar un accidente o lesión grave, los trabajos que son nuevos en una operación o que han sufrido cambios en sus procedimientos y también los trabajos lo suficientemente complejos como para requerir instrucciones escritas. Un JSA se lleva a cabo siguiendo cuatro pasos: primero, seleccione un trabajo para analizar las categorías descritas previamente; segundo, desglose el trabajo en una serie de pasos; tercero, identifique los peligros potenciales; y cuarto, determine las medidas preventivas para superar estos peligros [5].

El JSA trata de responder a las siguientes preguntas de rigor, entre otras diseminadas en la tabla 2:

Tabla 2. *Inquisiciones de rigor para completar el JSA*

Lugar de trabajo:	¿Dónde el accidente pasó?
Analista:	¿Quién evalúa el escenario?
Fecha:	¿Cuándo pasó el accidente?
Trabajo:	¿Qué trabajo se hizo? Nombre general.
Descripción:	¿Cuáles son las tareas? ¿Qué hace el operador? ¿Qué instrumentos usó?
Amenaza:	¿Qué fue lo que pasó? En detalles.
Controles:	¿Qué medidas se tomarán? ¿Cuáles son los nuevos pasos para la tarea? ¿Cuáles son las nuevas herramientas?

Evaluación de los cinco cotejos

Como resultado de esta investigación, se desarrolló el método Five Checkpoint Evaluation (FCE). Este brinda una idea de qué tan segura es el área de trabajo y mitiga los peligros existentes. El método obedece una disciplina de trueque o de reemplazo para garantizar entornos seguros; por ejemplo, si hay dos entornos posibles para consumir una labor: bajo el sol o bajo la sombra; la mejor decisión sería resguardar al trabajador de la exposición al sol y permitirle trabajar bajo la sombra. La evaluación está compuesta por cinco (5) elementos de estudio: cambio de un proceso, modificación de un proceso, intercambio de sustancias nocivas, mejora al ambiente y cambio de equipos y/o de artilugios; véase la figura 1.

Más de un elemento, puede ser atribuido a un caso en particular, para lograr un avance perceptible. El primer elemento hace referencia a un despiezado y una reorganización de todos los pasos a seguir para terminar un trabajo; es una alteración drástica y cabal, que precisará de muchas pruebas para comprobar su efecto positivo. El segundo, por el contrario, es una alteración parcial o superficial, que nunca herirá significativamente la costumbre del personal. Ahora bien, cuando se lidia con sustancias nocivas, que es el tercero, la intervención es inminente; se busca en sí atacar los químicos, los inflamables, los venenos u otro material intrínsecamente perjudicial para la salud humana.

El cuarto elemento se concentra en lo que no se puede alterar con la voluntad, ni trocar por otra cosa, pero sí se puede influir en él: el medio ambiente. Asumamos que el operativo de instalación de una turbina demoró desde el mediodía hasta la noche, y la zona además es extremadamente sombría. La mejor alternativa para este escenario, es encender un foco industrial o una lámpara potente para así alumbrar el área de trabajo; ¡esto es precisamente una mejora al ambiente!

El quinto elemento se explica fácilmente: se opta por utilizar las máquinas más seguras y las herramientas más amigables, que no expongan a ningún trabajador a nocividades o peligros. El ítem en parte propone mejoras a la indumentaria de protección personal.

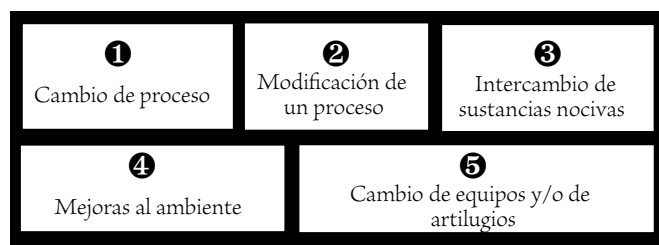


Figura 1. Forma para FCE

Jerarquía de control de riesgos

Ambas estrategias discutidas encajan con la jerarquía de control de riesgos, de cinco (5) componentes. Tales componentes están posicionados conforme a su nivel de efectividad, siendo el ítem de equipo de protección personal (EPP) el de menos efectividad y siendo el ítem de eliminación el de más efectividad; véase la figura 2.

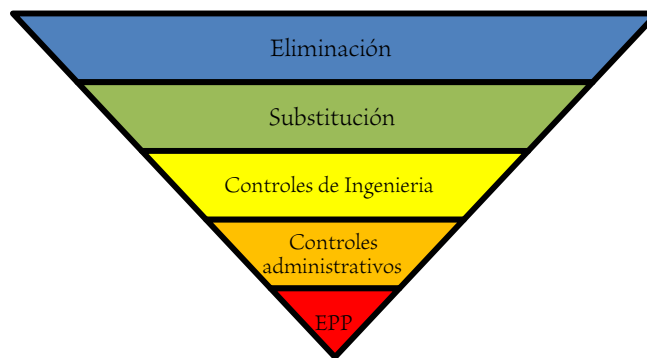


Figura 2. Diagrama ordenado de controles de riesgos en la industria, según la efectividad

Los controles de ingeniería llaman a la minimización de los peligros mediante el rediseño de una instalación, un equipo o un proceso, o la remoción de procesos, equipos, materiales u otros factores existentes para disminuir el peligro. Los controles administrativos, sin embargo, tienen en cuenta los procedimientos operativos escritos, los permisos de trabajo y las prácticas de trabajo seguras, teóricamente. Además, es responsable de las alarmas, los rótulos, los colores, las advertencias, la vigilia de los compañeros ("buddy systems"), los simulacros y las capacitaciones o "trainings" [5].

El equipo de protección personal (EPP), como respiradores, protectores auditivos, mamelucos, gafas de seguridad y gorro, es aceptado como un método de control en las siguientes circunstancias: cuando los controles de ingeniería no son factibles o no eliminan el peligro, mientras que los controles de ingeniería están en desarrollo, cuando las prácticas de trabajo seguras no proporcionan suficiente protección, durante todas las emergencias. En realidad, si el peligro no puede eliminarse por completo, las medidas de control adoptadas probablemente serán una combinación de los tres elementos instituidos simultáneamente o se recurre a medidas drásticas, como la sustitución y la eliminación [5].

Casos de estudio

Después de conocer, a través de la investigación y la literatura, los riesgos laborales más comunes que se detectan cuando se trabaja con un aerogenerador, las actividades realizadas para las fases del ensamblaje, de la instalación, del mantenimiento y del desmontaje se acondicionaron y se organizaron en un diagrama de flujo, que navega el proceso paso a paso. El diagrama de flujo ayuda al final a los operadores a tener una mejor comprensión de lo que se necesita ejecutar para instalar una turbina eólica en un poste de luz más seguramente. Las tareas de ensamblaje serían aquellas relacionadas con la compenetración de los diferentes componentes en una sola pieza, el producto final; las tareas de instalación son aquellas relacionadas con el transporte del producto final a su destino final, el poste de luz; las tareas de mantenimiento, que también pueden admitir tareas de reparación, son aquellas realizadas para reparar y/o acondicionar el aerogenerador para que funcione correctamente y proporcione resultados deseables; las tareas de desmantelamiento son sólo el revés

de la disposición de las tareas de instalación; y las tareas de desmontaje describen el proceso de bajar la turbina del poste de luz para ser reemplazado por uno nuevo. Las tareas descritas en el diagrama de flujo son generales y absorben las pequeñas sub-tareas que pueden ser fundamentales.

Asumamos el siguiente caso: un empleado fue herido mortalmente montando el controlador de una turbina vertical de 3kW. Lo primero es definir cuáles son los componentes del EPP en el momento de tratar con la electricidad, detallado en la tabla 3.

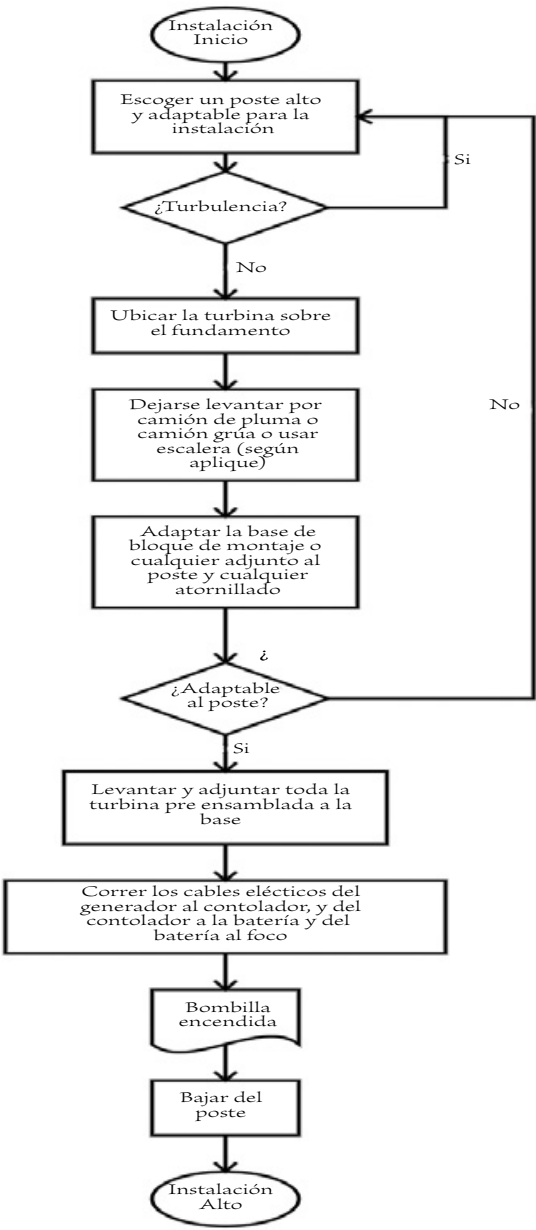
Tabla 3. EPP recomendado en la gestión de instalar, reparar, mantener y desinstalar (destacar según caso)

Componentes	
EPP	(1) Capacete (2) Guantes (3) Botas de cuero (4) Gafas (5) Protección auditiva o auriculares (6) Correa para herramientas
Equipo para tratar la electricidad	(1) Ropa de algodón, de mangas largas (2) Guantes (3) Protección facial o máscaras (4) Herramientas aislantes (herramientas de mano para prevenir incidentes de índole eléctrica)
Equipo para prevenir caídas	(1) Arnés completo a. Tirante, bandas, ajustes y enganches (2) Acollador doble (3) Sistema de arresto contra caídas

Luego, conviene estructurar las tareas en un diagrama de flujo entendible. Se destaca el paso específico que hace referencia a la electricidad, puesto que este paso se puede analizar en sub-tareas para procesar el caso que se asumido como caso de estudio. El seguimiento del flujo provisto en la figura 3 y su monitoreo son un modo de control administrativo; pero cuando se entra en una evaluación exhaustiva para alterar el flujo de las actividades, ya se entra en el ejercicio de aplicar unos controles de ingeniería.

Convendría en este caso supuesto, de incidente con la electricidad, exhortar (y hacer acatar) a los futuros técnicos a usar una ropa cómoda de algodón, puesto que ésta es la opción fundamental cuando se anexan al circuito equipos de baja tensión; de mangas largas, para proteger los dos brazos hasta las muñecas. Para enfrentar los problemas de alta tensión, se viste a los trabajadores con otro tejido material, como la tela conductora. El color blanco

refleja todos los colores, por tanto, repela la luz solar si se determina instalar las turbinas durante la mañana. Por el hecho de estar manipulando una electricidad de baja tensión, no significa que se esté exento de algún peligro, así que hay que guardar las manos con el uso de los guantes: el material es respectivo a los riesgos eléctricos, el cual puede ser cualquiera que sea cómodo para el usuario. De ser el caso de estudio uno que indique riesgos mecánicos o térmicos, el material del guante variará conforme a su nivel de prestación para cada parámetro, que comúnmente rondará entre el 1 al 4 [8].



Powered by DrawExpress

Figura 3. Diagrama de flujo para actividades de instalación (destaque según caso)

Para el mismo caso, se recomendaría usar como una protección rostral al menos unas gafas protectoras, de montura universal. Otras opciones son unas gafas de una montura integral o una pantalla facial.

No menos importantes son aquellos instrumentos de instalación, reparación o mantenimiento; en los cuales están debidamente saturados sus puntos de contacto de una goma

o de un plástico. Esto en realidad sirve de doble protección en conjunto con los guantes, para así no dejar acceder la corriente al cuerpo y no sufrir moretones o tragedias de shock.

En relación con el caso de estudio, para asegurar que ningún otro incidente ocurra, se debe usar el JSA y la FCE. Unos JSA y FCE que evaluarían el caso lucirían como aquellos sugeridos por la tabla 4 y la figura 4:

Tabla 4. Ejemplo de un JSA para el caso de estudio

Lugar de trabajo:	Empresa haciendo gestiones instaladoras en la zona de parqueo de una fábrica
Analista:	Juan Prados, Licencia #1234
Fecha:	Miércoles, 27 de febrero de 2019, a las seis y treinta de la tarde
Trabajo:	Instalación de un controlador eléctrico CD (corriente directa)
Descripción:	El técnico es especializado en la completa instalación de los equipos eléctricos, desde el regulador hasta la luminaria. Su trabajo es cerrar el circuito para que el alumbrado pueda concretarse, usando una pinza y un candado (lockout/tagout).
Amenaza:	<ul style="list-style-type: none"> El técnico llegó a las seis de la tarde, la hora acordada tres horas después del montaje mecánico inicial de la turbina al poste de treinta pies, para empatar los cables de calibre veintidós (cables triples del mismo color) al controlador. La turbina no estaba adecuadamente asegurada de manera mecánica para regular en sí el flujo del viento, ni el interruptor estaba en operación. Debido a la confusión de los cables (los mismos cables que a la hora de instalación de la caja, estaban vivos) las polaridades fueron accidentalmente intercambiadas, resultando en daños físicos del técnico, quemaduras en su rostro y daños del equipo. Se trabajaba con cierta rapidez, para satisfacer la demanda de veinte postes en una tarde.
Controles:	a) Asegurémonos de invertir el orden en que los componentes tanto mecánicos como eléctricos son instalados, dando la prioridad a lo eléctrico. b) Pre-ensamblar aquellos componentes eléctricos antes de anexarlos con los componentes mecánicos. c) Asegurémonos de activar el interruptor de corriente antes de empatar cables. d) Asegurémonos que dichos cables sean de distintos colores, probablemente cambiar de suplidor o compañía manufacturera, siendo cabalmente combinables con las entradas de los reguladores. e) Entablar un horario más conveniente para proceder en las instalaciones de índole eléctricas; llevar un plan para instalar las veinte turbinas en menos tiempo. f) Asegurémonos de proveerle al técnico un sistema de elevación automatizada y un ayudante entrenado, con el móvil de compartir tareas.

Veamos cómo se traduce todos los controles recomendados a una FCE para una clasificación certera de las mejoras.

1 Alternativa (a) y (b)	2 Alternativa (c)	3 Alternativa (d)
4 Alternativa (e)	5 Alternativa (f)	

Figura 4. Ejemplo de una FCE para el mismo caso de estudio

Conclusión

Todas las actividades pueden implicar ciertos riesgos y su respectiva prevención puede complicarse debido a muchas

tareas involucradas en una operación o escasa experiencia en el trabajo. Sin embargo, los riesgos en las tareas y/o las actividades se pueden identificar y se pueden tratar con paciencia, utilizando las pautas de OSHA y otras organizaciones de seguridad como un programa de ayuda para controlar los peligros. Las actividades complejas se pueden intercambiar y estudiar con el JSA, la FCE, entre otros métodos no discutidos en este documento. En este estudio particular, los métodos mencionados fueron aplicados a algunas actividades de las etapas del ciclo de vida de la turbina, que son sensibles al error humano y requieren guías y entrenamiento adecuado. Capacitar a los operadores y supervisores en estos métodos puede mejorar los sistemas, reducir las lesiones y salvar vidas. Además, estos métodos pueden ayudar a desarrollar más los manuales de operación y las políticas de seguridad.

Referencias

- [1] Chaumel, Jean – Louis, Giraud, Laurent, & Ilinca, Adrian. (2015). *Mechanical and Physical Risk Prevention, IRSST – Study and Research Projects. Report R-858 – Wind Energy Sector: Occupational Health and Safety Risks and Accident Prevention Strategies*. IRSST – Communications and Knowledge Transfer Division: 505 De Maisonneuve Blvd. West, Montréal, Québec. Pgs. 1 – 13.
- [2] European Wind Energy Association. (2014). *Wind in Power: 2013 European Statistics*
- [3] Mooney, Chris (2015). *Energy and Environment: The U.S. wind energy boom couldn't be coming at a better time*. The Washington Post.
- [4] *Occupational Safety and Health in the Wind Energy Sector – European Risk Observatory Report*. ISSN: 1831 – 9343. Luxembourg: Publications Office of the European Union ISBN: 978-92-9240-277-8. DOI: 10.2802/86555.
- [5] U.S. Department of Labor Occupational Safety and Health Administration OSHA 3071. (2002). *Job Hazard Analysis*.
- [6] Qingdao Zeyu Wind Power Generator Co., Ltd. *FDV Series Vertical Axis Wind Turbine System (User's Manual FDV 300W-2KW)*.
- [7] *Best Practices in Small Wind: Tower Climbing Safety Draft*. <http://smallwindconference.com/wpcontent/uploads/2012/02/BP-doc-ver-4.pdf>.
- [8] Pérez Zorrilla, Susana. (2012). *Elementos de Protección Personal*. Oficina de Gestión de Higiene, Seguridad y Medioambiente Laboral.
- [9] Wisner, Ryan, Bolinger, Mark, Lawrence Berkeley National Laboratory. (2017). *2017 Wind Technologies Market Report*. U.S. Department of Energy: Office of Energy Efficiency & Renewable Energy.

Los autores

Los autores Kenneth J. Martínez-Torres, EIT, kmartinez91@suagm.edu. Jannette Pérez-Barbosa, PE - Departamento de Ingeniería Industrial y de Gerencia de la Universidad Ana G. Méndez, jperez222@suagm.edu

MAC Engineering & Electrical Testing, P.S.C

Your Power Quality Consultant!

Certified Power Quality Consultants and Energy Managers by the Association of Energy Engineers

Engineering & Services

- Electrical Design
- Electrical Construction
- Power Factor Correction
- Power Quality Analysis
- Power Quantity Surveys
- Arc Flash Hazard Analysis
- Short Circuit and Coordination Studies
- Energy Management
- Electrical Substation Maintenance and Acceptance Testing
- Thermal Imaging Surveys
- Power Quality Mitigation
- Educational Seminars
- NFPA 70E Training

Products

- Power Monitoring Equipment
- Power Factor Correction Capacitors
- Harmonic Filters
- High Voltage S&C Fuses and End Fittings
- HV & LV Voltage optimization systems
- Single-To-Three Phase Power Converters
- Current transformers (CT)
- Potential Transformers (PT)
- Customized Electrical Switchgears and Enclosures
- Static and Rotary UPS Systems

(787) 307-6581

428 Road 693, PMB-382, Dorado, PR 00646 • Fax (787) 796-7156 • Email: info@mac-engineering.com

ANÁLISIS DE ALTURAS ORTOMÉTRICAS Y DERIVADAS: CASO DE NIVELACIÓN DEL 2018 EN ISABEL SEGUNDA, ISLA MUNICIPIO DE VIEQUES, PUERTO RICO

Javier Charón del Red Sísmica de Puerto Rico, Departamento de Geología-Decanato de Artes y Ciencias, y George Cole, Carlos Huerta y Linda L Vélez del Departamento de Ingeniería Civil y Agrimensura-Decanato de Ingeniería, UPR – RUM

RESUMEN

En este artículo se presentan las tareas llevadas a cabo durante el verano del 2018 relacionadas a las nivelaciones de los controles de los mareógrafos que tiene bajo su responsabilidad la Universidad de Puerto Rico-Recinto Universitario de Mayagüez (UPRM), por conducto de la Red Sísmica de Puerto Rico. Durante el verano se ampliaron los trabajos de nivelación en Vieques, alcanzando el Museo Forte Conde de Mirasol, en donde se colocaron y develaron tres marcas conmemorativas utilizando observaciones previas del *Global Navigation Satellite System* (GNSS) para obtener las coordenadas y la altura. El resultado del análisis de la nivelación de una distancia de sobre 1,100 metros de recorrido desde el muelle y de sobre 16 horas de trabajo en el campo obtuvo comparar los resultados de dos tecnologías con las observaciones obtenidas de GNSS y las correspondientes a la nivelación diferencial con equipo geodésico en lo referente a las alturas ortométricas.

INTRODUCCIÓN

El propósito de este artículo es capacitar a los agrimensores con herramientas de trabajo, de procesamiento de datos obtenidos con GNSS, los cuales son receptores de

los sistemas de posicionamiento global de frecuencia doble y otros servicios disponibles a través del *National Geodetic Survey* (NGS) - <https://www.ngs.noaa.gov/>. Este lugar cibernético cuenta con un sinnúmero de recursos para que los trabajos geoespaciales se hagan en los marcos de referencia apropiados que asistan a pronosticar tendencias futuras. Ejemplos de estas incluye al cambio de DATUMS o Marcos de Referencia para el 2022. Para esa fecha se contará con un datum geométrico y otro geopotencial, lo cual sustituirá los datum horizontales y verticales. Para Puerto Rico, se desarrollará un datum horizontal diferente al vigente (NAD83 (2011)) y en el 2022 tendremos el *Caribbean Terrestrial Reference Frame of 2022* (CATRF2022), el cual se referirá a la placa tectónica del Caribe.

Durante el verano del 2018, se ampliaron los trabajos de nivelación en Vieques hasta llegar al Museo Forte Conde de Mirasol, en donde, en tres visitas, se instalaron y se observaron con GNSS. Al completar este proceso, se develaron tres marcas conmemorativas; estas son: la de los 170 años en acero inoxidable; la dedicada al Agrim. José C. Silvestre Ortiz y la dedicada a los esposos Ing. María M. Casé Ballesteros e Ing. Rafael Cruz Pérez, coloquialmente conocidos por Tita y Rafa. Estas marcas conmemorativas tienen un diámetro

de 10" ambas con cobertura y tapa de 6" de diámetro, con chapas de aluminio de 3.5" de diámetro, rotuladas en su círculo exterior como "UNIV. DE P. R. MAYAGÜEZ PUNTO DE CONTROL", en su círculo interior "AGRIMENSURA Y TOPOGRAFÍA GPS", y en el centro tiene un triángulo equilátero con un punto en su centro. Alrededor de dicho triángulo se personalizaron cada una de estas dos chapas conmemorativas. (Refiérase a la figura 1.)

A base de las observaciones previas de GNSS, se obtuvieron las coordenadas y alturas de dichas marcas emblemáticas. Como producto del análisis de la nivelación de una distancia de sobre 1,100 metros de recorrido desde el muelle, y sobre 16 horas de trabajo en el campo, se pudo

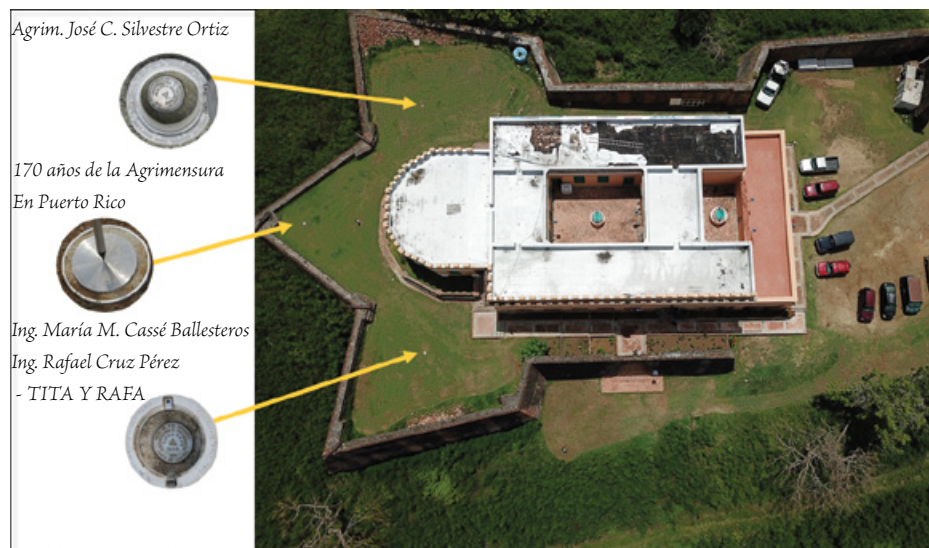


Figura 1 - Foto Aérea tomada desde un UAV (DRONE) el 18 de mayo 2018, por el Ing. Edgard Hernández, con las imágenes de las tres marcas instaladas en el Museo Forte Conde de Mirasol, mostrando su ubicación en el predio del museo.

comparar los resultados de dos tecnologías con las observaciones obtenidas de GNSS y las correspondientes a la nivelación diferencial con equipo geodésico en lo referente a las alturas ortométrica. Usando observaciones de GNSS y la altura ortométrica, se obtuvo la altura ortométrica derivada, la cual es producto de una nivelación diferencial partiendo de un *Tidal Bench Mark* (TBM) referidos a un datum que toma en consideración los niveles promedios del mar, que en este caso es el *Puerto Rico Vertical Datum of 2002* (PRVD02), la cual presenta el nivel promedio del mar entre el 1982 al 2001.

Como es de conocimiento en la disciplina de la geodesia, la nivelación es un procedimiento en agrimensura en donde se obtiene la diferencia en elevación o alturas entre dos puntos en un plano vertical. Se usa una superficie de referencia para medir esas alturas, la cual se denomina *DATUM*. La definición de un *DATUM* que más acertada hemos encontrado tanto para el plano horizontal como el plano vertical es la expresada en la publicación *NOAA Technical Memorandum NOS NGS-50*, escrita por Warren T. Dewhurst el enero del 1990 en donde se indica que: “Un *DATUM* es un conjunto de parámetros que definen un sistema de coordenadas y de puntos de control cuya relación geométrica es previamente conocida, sea por medidas o cálculos. Todos los *DATUMS* se fundamentan en un esferoide o elipsoide de referencia, el cual aproxima la forma de la Tierra”.

El datum vertical es un datum local, el que se refiere a las elevaciones o alturas. El programa denominado *Height Modernization* bajo el NGS, (<https://www.ngs.noaa.gov/heightmod/>), entre otras cosas, busca obtener alturas confiables y globalizar los productos de la tecnología GNSS. Las alturas referidas al nivel del mar están relacionadas con la gravedad y, por ende, más estrechamente relacionado con la naturaleza... Las coordenadas obtenidas con GNSS, incluyendo las alturas desarrolladas por los adelantos tecnológicos y la figura del elipsoide que modela la forma de nuestro Planeta Tierra y las alturas, se denominan como *Height About Ellipsoid* (HAE), el cual desarrolla la siguiente ecuación empírica:

$$H = h - N$$

La ecuación relaciona las siguientes tres superficies en torno a su altura:

- i) La topografía: la que ocupamos nosotros y donde se hacen las observaciones,
- ii) el elipsoide en revolución: usada para definir el datum, y
- iii) el geoide; la superficie natural que responde a la atracción de la gravedad.

El geoide se utiliza como superficie de referencia debido a que coincide teóricamente con lo que denominamos el nivel promedio del mar o *Mean Sea Level* (MSL), es decir, las coordenadas que representan las elevaciones o alturas se miden desde esa referencia. La ecuación 1, representa la relación de la altura ortométrica (H), la altura elipsoidal (h) y la altura geoidal (N), también conocida como ondulación, teniendo como fuente para la altura ortométrica (H) la nivelación de

las distintas marcas. Con los datos generados por las observaciones de GNSS, obtenemos la altura elipsoidal (h). Usando un modelo matemático del geoide, denominado en esta ocasión *GEOID2012B*, obtenemos la altura geoidal (N). Si solo tenemos h y N, y usamos la ecuación 1 previamente citada, para obtener la altura ortométrica derivada. (Ver figura 2)

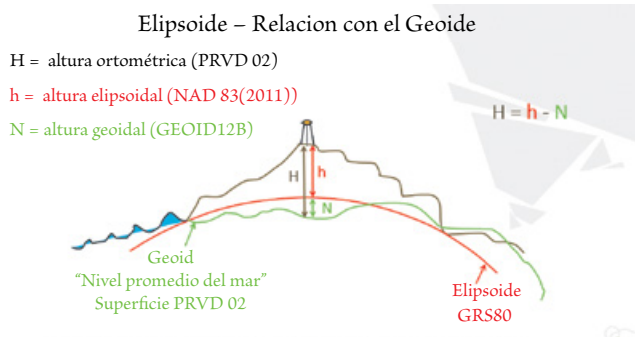


Figura 2 - Tres superficies (Topografía, Elipsoide y Geoide) y una sola realidad (en donde hacemos nuestras observaciones, esta la topografía) con relación de las alturas entre ellas

TRASFONDO HISTÓRICO

Desde el 2006, se ha estado llevando a cabo una investigación aplicada en UPRM, donde participan dos colegios: el Colegio de Artes y Ciencias y el Colegio de Ingeniería. La Red Sísmica de Puerto Rico, adscrita al Departamento de Geología del Colegio de Artes y Ciencias, fue la organización bajo la cual se solicitaron los fondos necesarios para la instalación, operación y mantenimiento de seis mareógrafos en Puerto Rico. Estos fondos fueron competitivos y disponibles a raíz de la catástrofe del 26 de diciembre del 2004 ocurrida en Sumatra, Asia, cuando el gobierno de los Estados Unidos de América, por conducto de la Administración Federal de Manejo de Emergencias (F.E.M.A. por sus siglas en inglés) convocó a las instituciones cualificadas a someter propuestas para instalar sistemas de Alertas de Tsunami en los EE.UU y sus territorios.

Luego de competir, se le otorgó a la UPRM en el 2005 la dádiva y, en el 2006, se comenzó la instalación de seis mareógrafos para monitorear las mareas alrededor de la isla de Puerto Rico, la cual cuenta con aproximadamente 325 kilómetros de costa vulnerables a los efectos de tsunamis. El proyecto tuvo un costo de sobre \$750,000 siendo uno de índole interdisciplinario por ser solicitado desde el comienzo de la participación del Colegio de Ingeniería y, muy en específico, del Programa de Agrimensura y Topografía del Departamento de Ingeniería Civil y Agrimensura del RUM.

Puerto Rico, al guardar una relación muy estrecha con los EE.UU tiene como agencia regulatoria el NGS (anteriormente denominado el *United States Coast and Geodetic Survey*, USC&GS por sus siglas en inglés). La NGS estableció en **Puerto Rico** hace más de 60 años, dos (2) mareógrafos: uno en la costa del Océano Atlántico en la Puntilla en el Viejo San Juan y otro en la costa del Mar Caribe en la Isla Magüeyes en Lajas. La instrumentación consistía del mareógrafo marca

Sutron y el sensor acústico, *Aquatrack*. El sensor se nivela en relación a cinco marcas establecidas en lugares lo más estables posibles con un arreglo radial. Anualmente se instalaría una marca hasta completar diez. Estas marcas son chapas de bronce de 3.5 pulgadas de diámetro, rotuladas en su círculo exterior, UNIV. DE P. R. MAYAGUEZ TIDAL BENCH MARK; en su círculo interior, RED SÍSMICA DE P. R. DEPTO. DE GEOLOGÍA; y en el centro, una **línea con una pequeña** raya perpendicular en el centro de la misma. Cada una de estas marcas se les escribe los cuatro últimos números del mareógrafo, una letra y el año de su instalación. Todos los años se realiza una nivelación diferencial de 2^{do} orden primera clase, seguido por el cambio de sensor a cargo del personal de la Red Sísmica de Puerto Rico en todas las marcas de cada mareógrafo y el sensor, siguiendo las especificaciones del NGS que está bajo la jurisdicción del Departamento de Comercio de los Estados Unidos de América, de la Administración Nacional de Oceanografía y de la Atmosfera (NOAA, por sus siglas en inglés) y bajo lo que se denomina el Servicio Nacional de los Océanos (NOS, por sus siglas en inglés). Bajo NOAA, se regula directamente

los mareógrafos en el Centro Operacional de Productos y Servicios Oceanográficos (CO-OPS, por sus siglas en inglés).

Observaciones estáticas también se realizaron en las marcas o los *Tidal Bench Marks* (TBMs), constituyendo de por lo menos dos horas con receptores de GNSS de frecuencia doble, procesados con el servicio de *Online Positioning User Service* (OPUS por sus siglas en inglés). Muchas de estas marcas o TBMs se observaron por cuatro horas con GNSS y están disponibles en la página web del NGS en la sección del *OPUS Shared Map*, (<https://www.ngs.noaa.gov/opusmap/>). En el reporte del *OPUS Shared*, la marca se le asigna un *Permanent Identifier* (PID). Al no suceder, la marca formaría parte de la Base de Datos del NGS, en la sección denominada *National Spatial Reference Systems* (NSRS), la cual incluiría: las coordenadas en varios sistemas, dos fotos y una descripción de donde se encuentra en tiempo real usando el servicio de *Google Earth*. Se puede solicitar orientación de cómo llegar a dicho lugar en línea, acceder el *Data Sheet*, y verificar si la marca o TBM es parte del NSRS. (Ver figura 3), que ilustra el ejemplo TBM 975-2619 B.

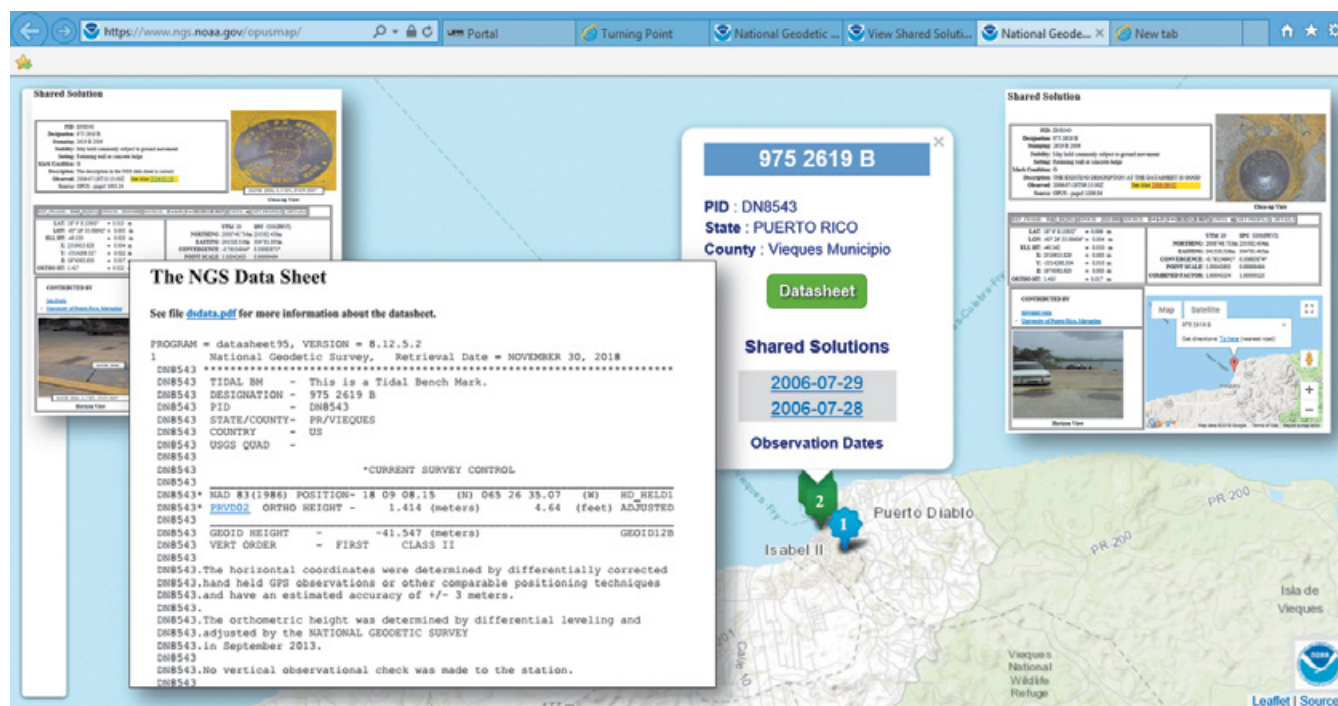


Figura 3 - Ejemplo del "opusmap" con 975 2619 B, su "The NGS Data Sheet" sus dos Opus - "Shared Solution"

En el 2006, se instalaron seis mareógrafos teniendo como factor primario la seguridad de los equipos para evitar la vandalización o el robo. Estas se instalaron en los siguientes pueblos: Mayagüez (Puerto de Mayagüez); Arecibo (Puerto de Arecibo); Fajardo (Puerto de Fajardo); Vieques (Puerto en Isabel Segunda); Yabucoa (Puerto de Yabucoa de la antigua petroquímica Shell); y en el Puerto de Eco-Eléctrica en Peñuelas. Se cambiaron dos de estos lugares en el 2014: Mayagüez se cambió por un mareógrafo re-instalado en

Aguadilla, luego del paso del Huracán Sandy, después de haber derrumbado la plataforma donde la NOAA había instalado el mareógrafo; luego, el mareógrafo instalado en las facilidades de Eco-Eléctrica en Peñuelas se trasladó a la Reserva Natural de Caja de Muertos al sur de Ponce. En cada uno de estos lugares se han instalado los equipos necesarios de los mareógrafos acústicos en una caja de aluminio junto con equipo de meteorología y las marcas o TBM hasta un máximo de 10.

Este proyecto de investigación aplicada forma parte del Sistema de Alerta de Tsunami y guarda una relación muy estrecha con las oficinas de los municipios costeros de Puerto Rico y su Oficina Municipal de Manejo de Emergencia. Además, se generaron mapas de desalojo de zona susceptible a efectos de un tsunami para estos municipios. En términos del método de nivelación, es una diferencial de 2^{do} orden primera clase, con un nivel modelo DNA 03 marca LEICA, con miras INVAR marca NEDO de tres metros en código de barra. Se lleva unos apuntes de los datos que se entran al nivel digital, incluyendo la temperatura a unas distancias de 0.3 metros y 1.5 metros del trípode de madera rígido, junto con un estimado de velocidad del viento y las condiciones meteorológicas del Sol. Estos datos se toman en lo que se denomina una corrida doble y se procesan usando los programas generados por el NGS denominados TransLEV y WinDESC. Cada marca o TBM, al igual que el mareógrafo, se incluyen con su historial de monumentación, ubicación y descripción en el archivo del programa WinDESC. Al correr estos programas con los datos de la nivelación diferencial se generó un archivo denominado LVL, el cual muestra en líneas de cuando comenzó la nivelación hasta las líneas que se generaron. Luego de concluir este proceso, se genera un "Abstract" que indica las elevaciones del sensor y de todos los TBMs.

En el año académico 2007-2008 se contó con el Dr. George Cole (co-autor de este documento y Profesor Adjunto de UPRM) como profesor visitante, pues tiene una rica experiencia de lo que fue la agencia federal del USC&GS, y ha escrito un sinnúmero de documentos técnicos y libros sobre estos temas. Durante su visita en el 2007-2008, el Dr. Cole dictó en tres ocasiones un curso titulado "IN CI 5028 - Nivelación y Mareógrafos" donde se hace un ejercicio de campo usando un "mareógrafo ilustrativo" instalado junto con sus marcas o TBM en los alrededores del campus.

TRABAJOS PREVIOS EN VIEQUES

En el año 2006, se realizaron varios trabajos en Vieques; uno en julio, en donde se efectuó la monumentación de los primeros cinco TBMs alrededor del Puerto de Isabel Segunda en Vieques. Estos cinco son: 975-2619A, 975-2619B, 975-2619C, 975-2619D, y 975-2619E, y estas se observaron por 5.5 horas con receptores de GNSS por tres días consecutivos. En noviembre, luego de la develación de la marca conmemorando los 160 años de la regulación de la agrimensura en Puerto Rico, promulgada por el Conde de Mirasol don Rafael Aristegui y Vélez, instada en la entrada de la sede del Colegio de Ingenieros y Agrimensores de Puerto Rico en San Juan, un grupo de estudiantes del Capítulo Estudiantil del Instituto de Agrimensores del UPRM viajaron el fin de semana del 19 a Vieques y a El Faro de Punta Mula para instalar dos marcas de 3.5 pulgadas de aluminio, provenientes de la UPRM, al igual que en el tope de un tanque de hormigón armado por la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados. Estos se observaron por dos horas con receptores de GNSS.

En los años siguientes, se viajó a Vieques para efectuar los trabajos de nivelación viajando ida y vuelta el mismo día a

Fajardo. En enero de 2012, se pernoctó en Vieques y se realizaron observaciones con receptores de GNSS por cuatro horas en dos TBM (975-2619F, y 975-2619G), junto con la nivelación. En otros años se viajó con el grupo de mantenimiento de la PRSN y se efectuó la nivelación y se les dio mantenimiento a los mareógrafos del este de Puerto Rico. Los lugares operados fueron: Yabucoa, Fajardo y Vieques. En el 2018, se visitó la Isla Municipio de Vieques en cuatro ocasiones: en febrero para instalar tres marcas en el Fuerte; en abril para observar las tres marcas junto a dos TBMs (975-2619H y 975-2619I) por cuatro horas con GNSS; en mayo se develaron las tres marcas en el Fuerte; y en julio se efectuó los trabajos de nivelación.

NIVELACIONES DESPUÉS DEL HURACÁN MARÍA

Como consecuencia del paso del Huracán María (20/09/2017) por el Archipiélago de Puerto Rico, solo seis mareógrafos de la Red Sísmica de Puerto Rico quedaron funcionales, a saber: Arecibo, Yabucoa y Vieques. Las nivelaciones de los tres mareógrafos se realizaron todas después del mantenimiento. Arecibo y Yabucoa se realizaron en los días 10 y 17 de julio del 2018, respectivamente. El mareógrafo de Vieques ubicado en Isabel Segunda tiene los 10 TBMs y anteriormente este trabajo tomaba unas seis horas. Por entender que es una aportación muy significativa, extendimos los trabajos de nivelación en este año 2018, para poder llegar hasta el Museo Fuerte Conde de Mirasol y darles alturas ortométricas a las tres marcas conmemorativas, y comparar dichos valores de las alturas ortométricas con las derivadas obtenidas ya con las observaciones de GNSS. Para esto se requirió un mínimo de tres días en la Isla Municipio de Vieques. Se viajó a Vieques, saliendo desde el Puerto de Fajardo a las 1:00pm, el 24 de julio del 2018 y regresando el 27 de julio del 2018.

Se constituyó una brigada de siete para hacer los trabajos en Vieques, a saber: Kiarimar Class, Jon A. Rivera, Dr. Carlos I. Huerta, Joselyn Huerta, Roberto Caraballo, Marcos H. Vélez, y Linda L. Vélez. Teniendo definido la logística de donde quedarnos todos juntos en Vieques, se comenzó a trabajar en la tarde del 24 de julio. Para incluir las marcas conmemorativas, se monumentaron dos nuevas marcas: una frente a la Plaza de Vieques justo en la entrada de la Iglesia Católica, la cual dedicamos a SIMÓN BOLÍVAR, pues él visitó a Vieques y fue el único lugar que el libertador de Las Américas piso en el archipiélago de Puerto Rico; y la otra en la acera opuesta a la entrada en camino al Museo Fuerte Conde de Mirasol, la cual se dedicó a MANUELA SANTIAGO, primera mujer alcaldesa de Vieques. Estas no se instalaron con cobertura ni tapa, se instalaron a ras de la superficie en la acera y, al igual que las dos marcas en camino al Museo Fuerte Conde de Mirasol, son chapas de aluminio de 3.5" de diámetro rotuladas en su círculo exterior como "UNIV. DE P. R. MAYAGÜEZ PUNTO DE CONTROL", en su círculo interior "AGRIMENSURA Y TOPOGRAFÍA GPS", y en su centro un triángulo equilátero con un punto en su centro, personalizados con los nombres de a quienes se les dedicó. Estas dos chapas, instaladas el día 24 de julio del

2018, aún no se han podido observar con los receptores de GNSS. Al día siguiente, el 25 de julio, se comenzó a nivelar los 10 TBMs y el sensor del mareógrafo, y se logró llegar a la décima línea (2619I-2619H) cerca de las 2:00pm. El jueves 26 de julio, amaneció lloviendo y, por ende, se comenzaron los trabajos alrededor de las 10:00am con varias interrupciones por la lluvia, terminando a las seis de la tarde. Resumiendo los trabajos de nivelación diferencial con equipo geodésico, obtuvimos que el primer día se emplazó el instrumento 34

veces, se pisó 10 TBMs dos veces cada una para definir las diferencias en elevación entre ellas, para un total de cuatro horas con 42 minutos. En el segundo día, se emplazó el instrumento 66 veces, se pisó 7 TBMs dos veces cada una para definir las diferencias en elevación entre ellas, para un total de ocho horas con 10 minutos. (Ver figuras 4 y 5). En la figura 4 se muestran varias fotografías de los trabajos de instalación de las dos nuevas marcas instaladas en la ruta al fuerte, junto con otras haciendo la nivelación.



Figura 4 - Fotos durante trabajos de monumentación (2 a la izq.) y la ruta recorrida durante la nivelación (3 a la dercha)

La figura 5 muestra en “Planta” la ubicación de los TBMs sobre una imagen de Google Earth junto con la ruta marcado con una línea roja, y abajo se presenta su “Perfil”. Noten la diferencia en altura desde la costa hasta el Museo Forte Conde de Mirasol.

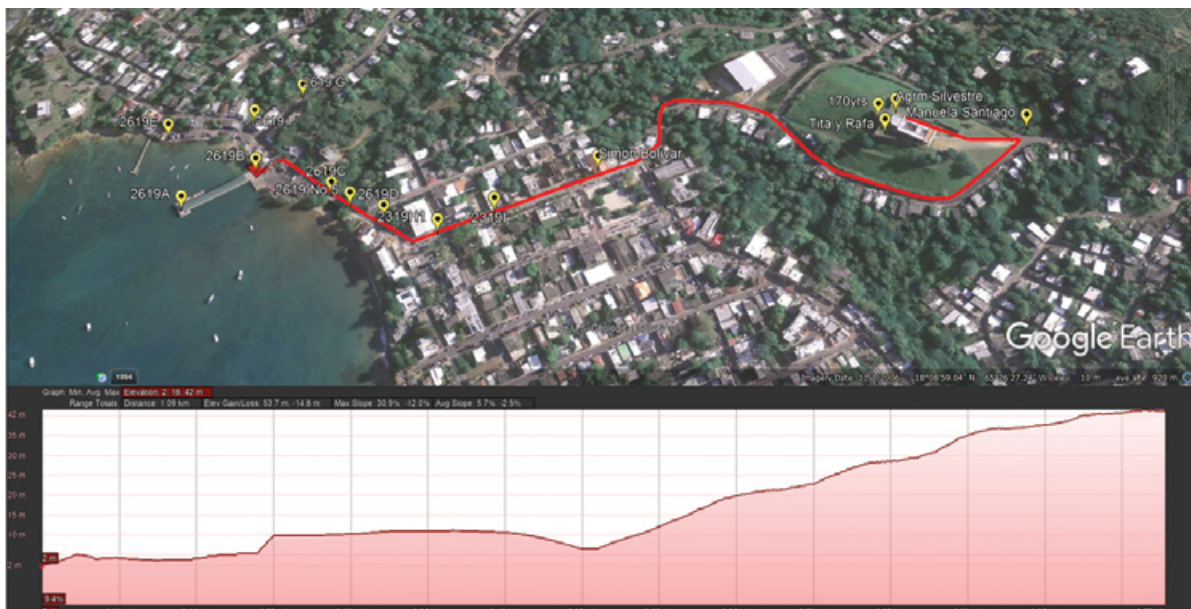


Figura 5 - Planta y perfil de la ruta recorrida durante la nivelación en línea roja y los BM en amarillo, fuente de imagen y perfil por Google Earth

CONCLUSIÓN

En las tablas 1 y 2, incluimos varios datos obtenidos de diversas fuentes de las doce (12) marcas pisadas de camino al Museo Fuerte Conde de Mirasol y su análisis. La tabla 1 titulada: "ALTURAS: H, N & h ECUACIÓN EMPÍRICA: $h = H + N$ ", incluye cuatro columnas con los siguientes títulos de izquierda a derecha: **BENCH MARK**; **H – Ortho Height-m (Source)**; **N – Geoid Height-m (Geoid12B)**; y **h – Ellipsoid Height-m (OPUS)**. Esta tabla presenta los datos de los doce (12) BMs, incluyendo los tres instalados en el Museo Fuerte Conde de Mirasol, dos (2) BMs nuevos instalados rumbo al fuerte y siete (7) de los TBMs que están en la ruta partiendo del 975-2619 B. La leyenda que se muestra en la parte inferior incluye primero un asterisco (*) que indica los valores de (h) cuando se incluyen dos por BMs con relación a los datos que aparecen en la cuarta columna titulada *h – Ellipsoidal Height-m (OPUS)*. Estas se sometieron a *OPUS Shared* junto a dos observaciones de GNSS independientes y se publicaron con resultados muy

parecidos. El segundo elemento de la leyenda es el acrónimo DS-NSRS, presente en la segunda columna indicando una de las cuatro fuentes de donde se obtuvo la altura ortométrica de cada BM. Los otros acrónimos (OPUS-R y OPUS-S) se refieren a dos maneras de obtener los resultados de los datos de observaciones de GNSS procesados por OPUS. El primero se refiere al reporte (por eso OPUS-R) que usted recibe vía correo electrónico al enviar a procesar sus observaciones y el segundo es el resultado al usted haber sometido sus observaciones para compartirlas en la página de *OPUS Shared*, el cual requiere que sus observaciones cumplan con ciertos criterios de calidad, dos fotos y una descripción, como se indicó en este documento. En esa segunda columna de esta tabla 1 aparece como fuente para obtener el dato de la altura ortométrica la Nivelación (Leveling). En término de los valores de N y h, quisiera advertirles que estos pueden ser positivos o negativos. Si la superficie del geoide esta sobre el elipsoide entonces N es positivo, si es lo contrario entonces N es negativo.

Tabla 1. Alturas: H, N, & h Ecuación Empírica: $h=H+N$			
Bench Mark	H - Ortho Height-m (Source)	N ° Geoid Height-m (GEOID12B)	h 0 Ellipsoid Height-m (OPUS)
975 2619 B	1.414 (DS-NSRS)	-41.547	-40.142 & -40.120*
975 2619 C	3.522 (DS-NSRS)	-41.550	-38.049 & -38.061*
975 2619 No. 2	3.612 (DS-NSRS)	-41.550	From Eq. is = -37.938
975 2619 No. 5	3.638 (DS-NSRS)	-41.551	From Eq. is = -37.913
975 2619 D	5.778 (DS-NSRS)	-41.553	-35.772 & -35.755*
975 2619 H	9.409 (OPUS-R)	From Eq. is = -41.555	-32.146
975 2619 I	10.942 (OPUS-R)	From Eq. is = -41.558	-30.616
Simon Bolívar	12.689 (Leveling)	Assume N = -41.55	From Eq. is = -28.861
Manuela Santiago	36.622 (Leveling)	Assume N = -41.57	From Eq. is = -4.948
Agrim José Silvestre	45.839 (OPUS-S)	From Eq. is = -41.577	4.262
170 yrs	46.502 (OPUS-S)	From Eq. is = -41.576	4.926
Tita y Rafa	45.385 (OPUS-S)	From Eq. is = -41.576	3.809
Leyenda: * - Bench Marks o marcas condos observaciones independiente de GNSS, publicadas en OPUS Sheared, de donde se obtuvo el valor de h; DS.NSRS • "Data Sheet" en el National Spatial Reference System del NGS; OPUS-R • Online Positioning User Service-Report en donde se presento el procesamiento de las observacion de GNSS.			

La Tabla 2 titulada "ALTURA ORTOMÉTRICA VS. ALTURA ORTOMÉTRICA DERIVADA" incluye cuatro columnas con los siguientes títulos de izquierda a derecha: **BENCH MARK**; **Ortho Height-m (Leveling)**; **Ortho Height-m (Data Sheet-PRVD02)**; y **Derive Ortho Height-m (OPUS)**. Esta tabla presenta los datos de los doce (12) BMs, incluyendo los tres (3) instalados en el Museo Fuerte Conde de Mirasol, los dos (2) nuevos instalados rumbo al fuerte y siete (7) de los TBMs que están en la ruta

partiendo del 975-2619 B. La leyenda mostrada en la parte inferior incluye primero un asterisco (*) que indica los valores obtenidos al incluir dos BMs, con relación a los datos que aparecen en la cuarta columna titulada *Derive Ortho Height-m (OPUS)*. Estas se sometieron a *OPUS Shared* junto a dos observaciones de GNSS independientes y se publicaron con resultados muy parecidos. La tabla 2 también incluye el elemento N/A¹, cual indica que la fuente a la cual se hace referencia en el título de la columna tres, *Ortho Height-m*

(Data Sheet-PRVD02), no aplica, es decir que los BMs en la respectiva línea no tiene disponible un Data Sheet en el NSRS. El N/A² incluida en los datos de la cuarta columna titulada *Derive Ortho Height-m (OPUS)*, no aplica la fuente

a la cual se hace referencia en el título de dicha columna, es decir que los BM en la respectiva línea no tienen disponible resultados de procesamiento de observaciones de GNSS al momento de este trabajo.

Tabla 2. Altura Ortométrica vs. Altura Ortométrica Derivada

Bench Mark	Ortho Height-m (Leveling)	Ortho Height-m (Data Sheet-PRVD02)	Derive Ortho Height-m (OPUS)
975 2619 B	1.41400	1.414	1.405 & 1.427*
975 2619 c	3.52186	3.522	3.501 & 3.489*
975 2619 No. 2	3.61219	3.612	N/A ²
975 2619 No. 5	3.63633	3.638	N/A ²
975 2619 D	5.77767	5.778	5.781 & 5.798*
975 2619 H	9.39627	N/A ¹	9.409
975 26191	10.90944	N/A ¹	10.942
Simon Bolívar	12.68882	N/A ¹	N/A'
Manuela Santiago	36.62197	N/A ¹	N/A'
Agrim José Silvestre	45.78230	N/A ¹	45.839
170yrs	46.44412	N/A ¹	46.502
Tita y Rafa	45.34637	N/A ¹	45.385
Levenda: * = Bench Marks o marcas condos observaciones independiente de GNSS, publicadas en OPUS Sheared; N/A1 = No tienen "Data Sheet" en el National Spatial Reference System del NGS; N/A2 = No tienen observación de GNSS			

Esta ecuación empírica ($H = h - N$), representa la relación de la altura ortométrica (H), la altura elipsoidal (h) y la altura geoidal (N), también conocida como ondulación. Teniendo la nivelación de las distintas marcas como fuente para la altura ortométrica (H), los datos generados con las observaciones de GNSS obtenemos la altura elipsoidal (h), y usando el modelo del Geoide, denominado GEOID2012B, obtenemos la altura geoidal (N). Si solo tenemos (h) y (N), y usamos la ecuación empírica ($H = h - N$), entonces obtenemos lo que se denomina altura ortométrica derivada, ya que es obtenida como consecuencia de las observaciones de GNSS. En el caso muy particular de los BM Simón Bolívar y Manuela Santiago (en la tabla 1, columna tres) se asume un valor de (N) para cada uno, dejándonos llevar de la (N) de los BMs más próximos a cada uno de ellos, llevados a solo dos lugares decimales. Para llenar el valor correspondiente a (h) de estos dos BMs, Simón Bolívar y Manuela Santiago, usamos el valor asumido de (N) en la ecuación empírica y resolvemos por (h).

Los TBMs denominados 975-2619 No. 2 y 975-2619 No. 5 se encontraron ya monumentados y se incorporaron al trabajo de mareógrafos de Vieques. El lugar donde se encuentran dichas marcas no es propicio para hacer observaciones

de GNSS. En las marcas Simón Bolívar y Manuela Santiago se espera poder hacer observaciones de GNSS y validar los resultados asumidos y obtener una altura ortométrica derivada, lo cual requerirá otra visita a Vieques y equipo para hacer observaciones de GNSS.

Podemos concluir que con ambos métodos, nivelación diferencial y las observaciones de GNSS, se obtienen las alturas ortométricas y las alturas ortométricas derivadas. Comparando estos métodos en términos de la relación de tiempo y esfuerzo, al igual que personal requerido, indicamos que es mucho más práctico obtener sus alturas ortométricas derivadas con un resultado aceptable en el orden de los centímetros.

Los Autores:

Javier Charon de la Red Sísmica de Puerto Rico, Departamento de Geología-Decanato de Artes y Ciencias, UPR – RUM; jcharon@prsnmail.uprm.edu.

George Cole, Carlos Huerta y Linda L Vélez del Departamento de Ingeniería Civil y Agrimensura-Decanato de Ingeniería, UPR – RUM; correos electrónicos: gcole32344@yahoo.com; carlos.huerta@upr.edu; linda.velez@upr.edu



"Instrumental To The Power & Process Industries Since 1961"

Process Measurements and Gas Detection Systems
Steam Systems and Heating Solutions
Pressure Relief & Tank Protection
Power Generation Equipment
Fluid Control



Call MRF for your special needs at 787-622-7080 or visit us at www.mrfpr.com



**CLEANER ENERGY
FOR A BETTER FUTURE**



- *Economical*
- *Environmentally friendly*
- *Sustainable*
- *Reliable*
- *Independent*

BIOGAS: The natural Choice
SEWAGE GAS: Economical power for treatment facilities
LANDFILL GAS: Making waste useful

- Maximum Efficiency in minimum space
- Exceptional Performance
- Exceptional Flexibility
- Complete Maintenance and support

Tel. (787) 622-9330
www.antillespower.net
EXCLUSIVE DISTRIBUTOR

AP
ANTILLES
POWER
**THE POWER
OF ENERGY**

PERVIOUS CONCRETE PAVEMENT TO MAKE A PUBLIC PLAZA MORE HANDICAP ACCESSIBLE AND ENVIRONMENTALLY FRIENDLY

Sangchul S. Hwang, PhD, PE, Rafael Terán-Rondón, BSCE, Alesandra C. Morales-Vélez, PhD, EIT, Ruben Segarra-Montelala, BSCE, PE, Juanchi Somoza López, Iván W. Ruiz-Vale, BSCE, EIT, Efraín Daleccio, BSCE, PE

ABSTRACT

The dosages of water-reducing admixture (WRA), viscosity-modifying admixture (VMA) and hydration-controlling admixture (HCA) were optimized for pervious concrete mix. An optimum pervious concrete mix was predicted to have a 14-day compressive strength of 17.1 MPa, permeability of 11.7 mm/s and mass loss of 43% with 0.9 mL WRA, 0.6mL VMA, 1.6 mL HCA (all per 1 lb cement), 5% (by wt. to cement) liquid coloring admixture, and 29.2% (by wt. to cement) total liquid. A public plaza was then renovated with the said optimum pervious concrete mix. It had a 10-cm pervious concrete slab and subbase water storage layers at varying depth by which it has a total water retention capacity of 21m³. A stable, leveled, firm and slip-resistant pervious concrete surface now makes the public plaza more handicap accessible, while stormwater infiltration through the pervious concrete pavement makes it more environmentally friendly with respect to runoff reduction in the downstream.

Keywords: Accessible; Chemical admixtures; Optimization; Pervious concrete; Stormwater

1. INTRODUCTION

Ambulatory disability is one of the six types of disabilities that also include hearing, visual, cognitive, self-care, and independent living. Ambulatory is defined as a disability because the person in question has difficulty walking or climbing stairs, or is a person in use of a wheelchair, cane, crutches or other walking aids. In fact, of the six, ambulatory disability had the highest prevalence rate in the United States (5.5%) and in Puerto Rico (9.1%) (Erickson et al., 2018a and 2018b). In order to minimize hazards for people with ambulatory disability, accessible surfaces must be stable, firm and slip-resistant. In addition, surfaces subject to wet conditions should be designed to prevent the accumulation of water (ADA, 2010).

As a best management practice for stormwater runoff control, pervious concrete pavement infiltrates water so as to reduce ponding on the roadway and flooding in the downstream. It also helps to enhance roadway safety by reducing the risk of hydroplaning and increasing skid resistance (Hwang et al., 2017; Sabnis, 2011).

Chemical admixtures such as water-reducing admixture (WRA), viscosity-modifying admixture (VMA), hydration-controlling admixture (HCA), air-entraining admixture, and anti-foaming admixture play an essential role in the

production of high performance concrete (Łaźniewska-Piekarczyk, 2013) and pervious concrete (Jimma & Rangaraju, 2015). Application of WRA is essential in the production of pervious concrete with adequate flowability to be quickly discharged from a ready-mixed concrete truck as pervious concrete is generally made of a low water-to-cement ratio of 0.26 – 0.40 (ACI, 2010). In addition, a significant improvement of strength and durability of concrete with a more compact, dense microstructure can result from the application of WRA as a consequence of the minimized water-to-cement ratio (Koehler et al., 2009).

Application of VMA also plays a critical role in pervious concrete production in preventing paste bleeding, which, due to paste draining to the bottom layer, causes a decrease in the strength and durability on the top layer of pervious concrete pavement due to insufficient past thickness and a reduction in overall permeability of the pervious concrete pavement (Jimma & Rangaraju, 2015; Koehler et al., 2009).

Another important performance requirement for pervious concrete is to resist rapid setting and allow a longer time for placement as well as before the application of curing. Therefore, it is a common practice to apply HCA to pervious concrete mixtures to maintain their workability. (ACI, 2010; Koehler et al., 2009). As the field construction in the current study was to be done in the summer month (high 32° C and low 22° C on average), the addition of HCA was essential in the production of pervious concrete to prolong cement hydration in hot weather.

In this study, pervious concrete pavement was used to renovate a public plaza on campus to be more handicap accessible and environmentally friendly in order to augment safety and livability at the University of Puerto Rico at Mayagüez (UPRM). To this end, a pervious concrete mix was first optimized in the laboratory with the chemical admixtures (WRA, VMA, and HCA) at different dosages for compressive strength, permeability and physical durability. It should be noted that it is critical to find an optimum proportion of the chemical admixtures to produce the desired structural and hydrological properties of pervious concrete. Then, the optimized pervious concrete mix was applied to renovate the public plaza. To the best of the authors' knowledge, the public plaza paved with pervious concrete was the first of its kind in Puerto Rico, designed to improve handicap accessibility with a safe, livable environmentally friendly surface and simultaneous stormwater runoff management.

2. MATERIALS AND METHOD

2.1. Main materials

The main materials used for the pervious concrete mix were cement, chemical admixtures, concrete pigment, and coarse aggregates. Type IS Portland cement (**Table 1**) was obtained from a local cement producer (Argos San Juan). The cement complies with ASTM C595.

Table 1. Characteristics of Type IS Portland cement used in the study.

Mineralogical composition(%wt.) (ASTM C114)						
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O _e	SO ₃
26.3	7.5	2.4	56.9	2.9	0.43	2.6
Others						
Blaine(m ² /kg) (ASTM C204)		Fineness(%wt.) (ASTM C430)		Iol*(%wt.) (ASTM C114)		
501		93.6		2.2		

•Loss-on-Ignition

For better flowability, stability and workability of the pervious concrete mix, WRA (BASF MasterGlenium 3030), VMA (BASF MasterMatrix VMA 362) and HCA (BASF MasterSet DELVO) were added in the production of pervious concrete. Liquid coloring admixture (BASF Rheocolor Olive Branch) was used as an integral color to make the pervious concrete pavement blend in with the surroundings. The characteristics of the chemical admixtures are shown in **Table 2**.

Table 2. Characteristics of chemical admixtures used in the study.

Type	pH	Density (g/cm ³)	Chemical component	Appearance
WRA	5-8	~1.05	Polycarboxylate	Brown liquid
VMA	~8.0	~1.002	Ethylene glycol	Light brown liquid
HCA	3.5	1.061-1.075	2,4,6- trichlorophenol Phosphoric acid	Red liquid
Pigment	8.5-9.5	1.82	Iron oxide hydrate	Oliver branch liquid

The coarse aggregates used were crushed limestone gravels in a size of 4.75mm to 9.5mm. They were acquired from a local quarry (PROCAN, Inc.). The mass ratio of coarse aggregates to cement was fixed at 4:1 in the pervious concrete mix. No fine aggregates (e.g., sand) were used in the current study.

2.2. Pervious concrete mix design

The pervious concrete mix was optimized for the permeability and 14-day compressive strength in a four factor, two

level (24) central composite design (CCD) with the factors of WRA, VMA, and HCA dosages (mL per 1 lb cement) and liquid-to-cement (L/C) percentage (% wt.) (**Table 3**). Liquid (L) is defined as the total amount of the liquid coloring admixture (olive branch color) and mixing water (tap water) in this study. The liquid coloring admixture was added to the pervious concrete mix at a fixed rate of 5% (by wt.) of cement. It is generally accepted that pigments used in amounts less than 6% do not affect concrete properties.

Table 3. The levels of the four factors in the central composite design.

Factors	Levels*				
	(-)axial	low	center	high	(+)axial
WRA	0.9	1.1	1.3	1.5	1.7
VMA	0.6	0.9	1.2	1.5	1.8
HCA	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6
L/C	27	28	29	30	31

* mL/lb cement for WRA, VMA and HCA; % wt. for L/C.

A mechanical mixer was used to prepare the pervious concrete mix in accordance with ASTM C192. The freshly mixed pervious concrete was cast in plastic molds (100 mm in diameter and 200 mm in height) with the standard rodding compaction method. After 24 hours, the specimens were demolded and cured in lime-saturated tap water for 14 days at ambient temperature (24 ± 2 °C).

2.3. Pervious concrete mix testing

After 14 days of curing, the specimens were tested for the permeability, compressive strength and physical durability. The permeability was tested by a constant head method modified from ASTM D2434 as follows:

$$Permeability (mm/s) = \frac{4 \cdot V_w \cdot L}{\pi \cdot D^2 \cdot \Delta h \cdot t}$$

(V_w) is water volume collected at a time (t), (L) and (D) are the height and diameter, respectively, of the pervious concrete specimen, and (Δh) is the constant water head.

The compressive strength was tested in triplicate in accordance to ASTM C39 by the 3000 kN Forney universal testing machine. The Los Angeles Abrasion testing was conducted to measure the mass loss, as a means of physical durability, in triplicate in accordance to ASTM C1747 as follows:

$$Mass Loss (\%) = \frac{M_o - M_t}{M_o} \times 100$$

(M_o) is the original mass of the pervious concrete specimen and (M_t) is the mass of the pervious concrete specimen after 500 revolutions of the steel drum at the time (t). The testing was conducted without the steel ball charges.

2.4. Pervious concrete mix optimization

The second-order polynomial equation was used to fit the data to describe the relationship between the responses and input variables as follows:

$$Y = \beta_0 + \sum_i^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j}^k \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon$$

(Y) represents the predicted response, (β_0) the intercept that is calculated by dividing the sum of the response values to the number of observation, (β_i) the first-order coefficient representing the linear effect of the factors, (β_{ii}) the second-order coefficient representing the quadratic effect between the factors, (β_{ij}) the coefficient of the interaction effect between the factors, (x_i) and (x_j) the levels of the factors, and (ε) the associated random error of the model (Montgomery, 2013). The established models are then to be used to make future predictions.

The significance of the factors to the responses and their main, interactive and quadratic effects on the responses were determined by Analysis of Variance (ANOVA). A factor with the p-value smaller than 0.05 was regarded to be statistically significant. That is, if the p-value of the ANOVA is less than 0.05, it can be regarded with a 95% confidence level that at least one of the model terms is significant. The ANOVA statistics such as the Lack-of-Fit with a significant level at 0.05 and the coefficient of determination (R^2) were used to evaluate the accuracy of the model. The Lack-of-Fit compares the pure, experimental error with the model error. The p-value of the Lack-of-Fit less than 0.05 indicates an erroneous model. The R^2 shows how close the data fit the models. The adjusted (R^2) can be obtained after correcting the (R^2) for the numbers of predictors (or terms) in the model.

An optimum pervious concrete mix proportion was obtained by the Optimizer (Minitab 17) for the responses. The adequacy of the prediction models was validated by comparing the predicted response values by the models with the measured values from the validation specimens which were made of the predicted optimum mix proportion.

2.5. Field site description

The public plaza is located on campus of the UPRM (18°20'92"N, 67°14'13"W). It consists of two areas (namely, Area 1 and Area 2). The Area 1 is adjacent to an L-shaped building and the Area 2 is an open plaza with a lamp platform at the center from which four ramps extend out. The Area 2 is separated from the Area 1 by a concrete sidewalk.

Before the pervious concrete pavement construction, both the Areas 1 and 2 were paved with square concrete pavers (60cm x 60cm, 5cm in thickness). However, the pavers were neither stable nor leveled, not to mention the wide gaps and severe lippage between the pavers. The public plaza was slippery and ponded after a normal rain event. Therefore, the public plaza was not handicap friendly at all before the renovation with pervious concrete pavement.

The public plaza is at one of the highest elevation on campus. Therefore, it did not have major run-on water from the

surrounding areas, except for the rain downspouts from the building on the Area 1 and the run-on water from the concrete sidewalks to both Areas. Therefore, the public plaza was largely a contributing area of stormwater runoff to the downstream on campus.

2.5. Site design

Unless otherwise specified, the pervious concrete pavement on the public plaza consisted of a pervious concrete slab (10cm in thickness), a subbase water storage layer (10cm in thickness) with crushed dolomite gravels (2.54cm in diameter). A geotextile separated the subbase layer and subgrade soil to prevent the subgrade soil from intruding to the subbase layer.

As the Area 1 is adjacent to a building and was receiving drainage water from rain downspouts, it was designed with a partial infiltration design (Fig. 1a). That is, the infiltrated stormwater through the pervious concrete slab was designed to be drained out via a perforated underdrain pipe (10cm in diameter) installed in the subbase water storage layer and, at the same time, to be infiltrated to the subgrade soil. The subgrade soil was leveled in a way to have a slope of 0.5% to induce water flow in the subbase layer toward the underdrain pipe that was connected to a storm sewer. A concrete strip (10cm thick, 61cm wide) was constructed on the Area 1 (Fig. 2) in such a way to place the benches in the middle of the pervious concrete pavement.

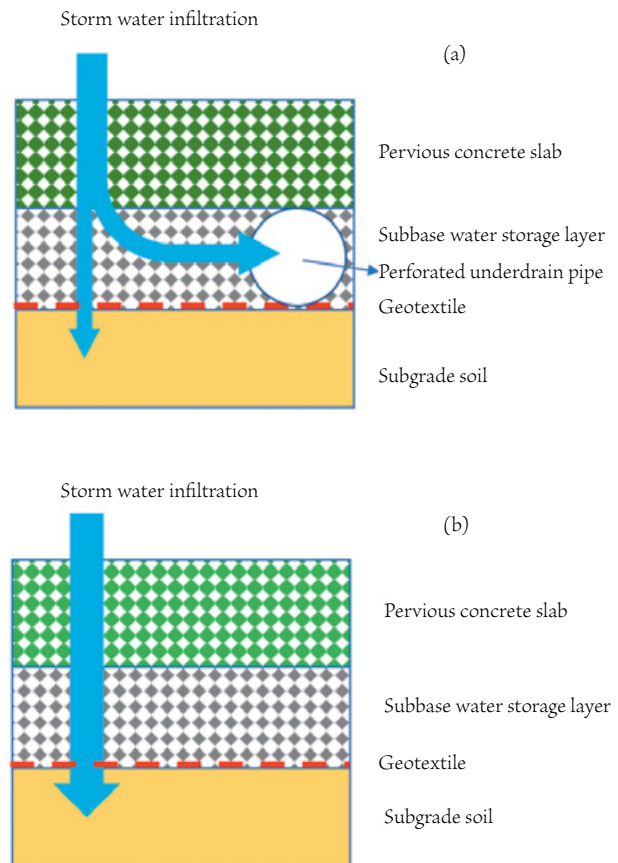


Fig. 1. Illustration of the partial infiltration design for the Area 1 (a) and the full infiltration design for the Area 2 (b).

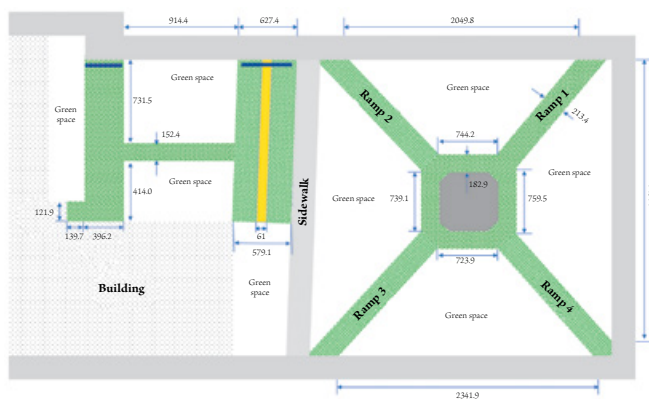


Fig. 2. Topical view of the Area 1 (bottom) and Area 2 (top) of the public plaza. Pervious concrete pavement is shown in green. The existing ordinary concrete sidewalks (213.4cm in width) are shown in gray. The yellow strip is the newly constructed ordinary concrete strip to install benches in the middle of pervious concrete area. The perforated underdrain pipes in the Area 1 are shown in blue. The drawing is not to scale.

In comparison, the Area 2 was designed with a full infiltration design (Fig. 1b), taking into consideration no major run-ons from the surrounding area and plentiful trees and bushes on its perimeters (Fig. 2). Therefore, all the infiltrated stormwater through the pervious concrete slab was designed to be stored in the subbase and be further infiltrated to the subgrade soil if not used by the trees and bushes. The ramps had a running slope of 2% to 3%. In order to increase water retention capacity and avoid a risk of structure failure due to slope-related underground erosion, all ramps had a subbase trench (61cm x 35.6cm x 213.4cm) 762cm away from the origin of the ramps (Fig. 3a). The ramps 2 and 3 had a running slope of 3% and also received run-on water from the sidewalks and, therefore, they had an additional subbase trench (61 cm x 71.1cm x 213.4cm) at the end (Fig. 3b).

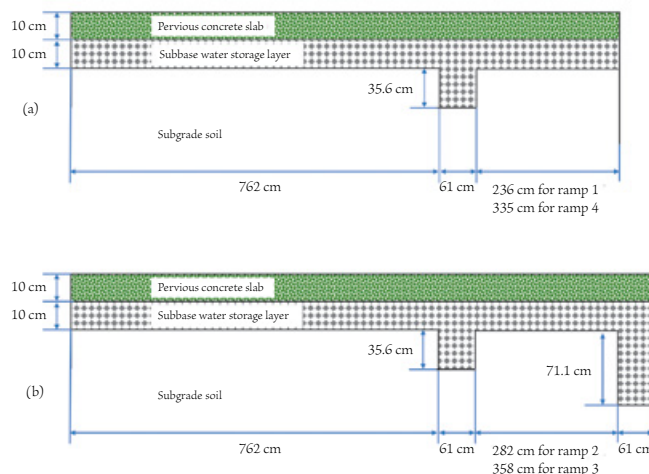


Fig. 3. Cross-sectional views of the ramps 1 and 4 (a) and the ramps 2 and 3 (b) in the Area 2 of the public plaza. The drawings are not to scale.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. Permeability, compressive strength, and mass loss

The permeability of the pervious concrete specimens ranged between 4.7mm/s and 19.3mm/s (Table 4). It should be noted that three combinations had a permeability of 0.0mm/s due to paste draining to the bottom of the mold. In general, the permeability fell in the reported ranges of 1.4mm/s to 12.3mm/s (ACI, 2010).

The permeability was inversely related to the compressive strength and a greater mass loss was observed with an increase of the permeability of the pervious concrete specimens in this study (Fig. 4a and 4b).

Table 4. The combinations of the factors and levels in the 2⁴ CCD and the results of the responses. Data are shown the average of the triplicate specimens.

CCD #	Factors and Levels ^a				Responses ^b		
	WRA	VMA	HCA	L/C	Permeability	Comp. strength	Mass loss
1	1.3	1.2	0.7	29	11.8	10.7	46
2	0.8	1.2	1.2	29	5.7	14.9	43
3	0.9	1.2	1.2	29	11.2	11.2	65
4	1.3	0.6	1.2	29	5.7	22.5	42
5	1.3	1.2	1.2	27	8.6	16.2	43
6	1.3	1.2	1.2	31	0.0	14.0	40
7	1.3	1.8	1.2	29	0.0	14.1	43
8	1.3	1.2	1.2	29	4.7	22.8	39
9	1.3	1.2	1.2	29	12.7	12.8	49
10	1.3	1.2	0.8	29	12.87	13.4	58
11	1.1	1.5	1.4	28	14.1	9.5	68
12	1.1	0.9	1.0	28	11.1	15.0	49
13	1.5	1.5	1.0	28	11.4	14.2	52
14	1.1	1.5	1.0	30	9.2	13.2	55
15	1.1	0.9	1.4	30	5.9	19.2	42
16	1.3	1.2	1.2	29	12.2	10.6	63
17	1.5	0.9	1.4	28	15.0	8.6	69
18	1.5	1.5	1.4	30	12.8	11.1	53
19	1.3	1.2	1.2	29	14.3	10.9	55
20	1.5	0.9	1.0	30	10.9	12.2	45
21	1.1	0.9	1.4	28	19.3	6.9	62
22	1.5	1.5	1.4	28	14.4	11.4	60
23	1.1	0.9	1.0	30	13.7	9.2	64
24	1.1	1.5	1.4	30	13.3	9.0	71
25	1.1	1.5	1.0	28	4.9	20.4	43
26	1.3	1.2	1.2	29	13.8	10.5	58
27	1.5	1.5	1.0	30	11.0	12.4	51
28	1.3	1.2	1.2	29	12.43	11.7	56
29	1.5	0.9	1.0	28	16.7	7.2	79
30	1.5	0.9	1.4	30	0.0	14.4	53

a mL/lb cement for WRA, VMA and HCA, where as % wt. for L/C.

b Permeability (mm/s), compressive strength (MPa), mass loss (% wt.)

The 14-day compressive strength was in the range of 6.9 MPa to 22.8 MPa (Table 4), which is in good agreement with the reported typical values of 2.8 MPa to 28 MPa (ACI, 2010). The greater the compressive strength, the lower the permeability or mass loss was found (Fig. 4a and 4c).

The mass loss was greater for a pervious concrete specimen with a higher permeability or a lower compressive strength (Fig. 4b and 4c). It ranged from 39% to 79% with an average of 55% (Table 4). López-Carrasquillo and Hwang (2017) reported the mass losses of 41% to 44% for the 28-day cured pervious concrete made of the same-sized coarse aggregates. The greater mass losses of the pervious concrete in the current study could have been attributed to a short curing time of 14 days.

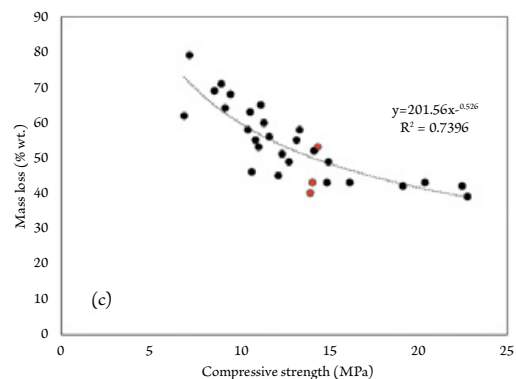
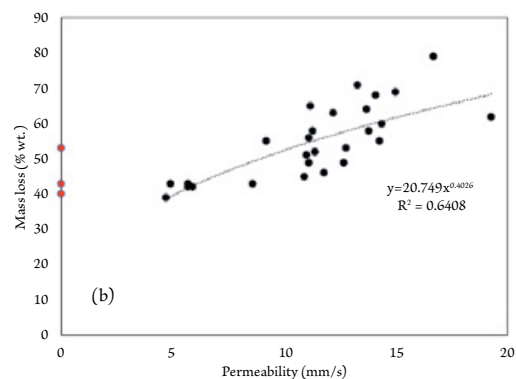
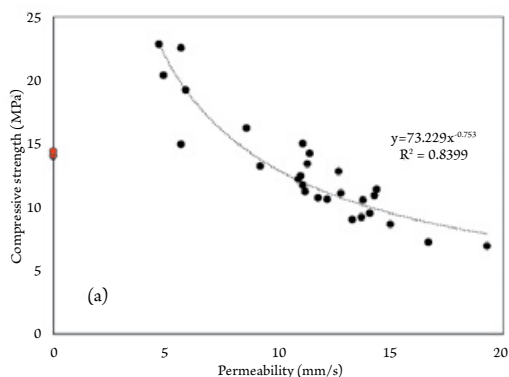


Fig. 4. Relationships among the permeability, compressive strength and mass loss of pervious concrete specimens. Three data points in red are from those CCD combinations of which the permeability was “zero” due to the paste draindown on the bottom of the specimens. Therefore, they are not taken into account in the regression.

3.2. Optimization of pervious concrete mix

The main, interactive and quadratic terms were statistically significant to the permeability prediction. In contrast, neither main, interactive nor quadratic term was statistically significant to the predictions for the compressive strength and mass loss (Table 5).

Table 5. The coefficient, *p*-values, Lack-of-Fit and *R*² from the Analysis of Variance.

	Term	Permeability		Comp. strength		Mass loss	
		Coeff.	p	Coeff.	p	Coeff.	p
Main	WRA	367.0	0.125	-90.6	0.541	599.8	0.084
	VMA	-477.6	0.006*	164.1	0.106	-356.6	0.113
	HCA	560.6	0.026*	-200.5	0.186	187.1	0.567
	L/C	149.2	0.038*	-10.5	0.805	99.2	0.301
Interactive	(WRA)(VMA)	33.9	0.176	5.2	0.737	-52.1	0.148
	(WRA)(HCA)	-77.1	0.049*	19.6	0.407	-37.5	0.474
	(WRA)(L/C)	-11.2	0.141	3.1	0.509	-21.3	0.057
	(VMA)(HCA)	67.3	0.014*	-25.5	0.118	64.6	0.079
	(VMA)(L/C)	14.8	0.008*	-5.6	0.087	12.9	0.079
	(HCA)(L/C)	-22.2	0.008*	8.4	0.089	-10.0	0.343

	Term	Permeability		Comp. strength		Mass loss	
		Coeff.	p	Coeff.	p	Coeff.	p
Quadratic	(WRA)2	1.2	0.965	-11.6	0.520	44.8	0.269
	(VMA)2	-33.8	0.015*	9.4	0.246	-12.0	0.497
	(HCA)2	44.5	0.126	-17.8	0.328	32.3	0.420
	(L/C)2	-2.2	0.059	0.1	0.938	-1.3	0.406
Constant		-2358.8	0.037*	247.1	0.711	-1637.2	0.279
Lack-of-Fit			0.883		0.687		0.218
R ² (%)		87.4		62.9		73.0	
Adjusted R ² (%)		71.9		17.2		39.7	

*Statistically significant terms (p<0.05)

As shown in **Table 5**, all p-values of the Lack-of-Fit for the responses were greater than 0.05. This means that the model fit the data adequately. Also, R² of the responses were 87.4% for the permeability, 62.9% for the compressive strength, and 73.0% for the mass loss indicating adequacy of the model. However, the adjusted R² of the compressive strength and mass loss were much lower than their R². This was because the regression contained the predictors (terms) that are not contributing to the model significantly. As previously mentioned, both main, interactive and quadratic terms were statistically insignificant in the predictions for the compressive strength and mass loss. The adjusted R² would not be different from the R² if the predictors (terms) contributes well to the model (Montgomery, 2013).

The prediction models for each response were obtained as follows:

Permeability (mm/s)

$$= 166X_1 - 216.6X_2 + 254X_3 + 67.7X_4 + 0.6(X_1)^2 - 15.32(X_2)^2 + 20.2(X_3)^2 - 1.018(X_4)^2 \\ + 15.4X_1X_2 - 35.0X_1X_3 - 5.06X_1X_4 + 30.5X_2X_3 + 6.72X_2X_4 - 10.09X_3X_4 - 1070$$

Compressive strength (MPa)

$$= -91X_1 + 164.1X_2 - 200X_3 - 10.4X_4 - 11.6(X_1)^2 + 9.43(X_2)^2 - 17.7(X_3)^2 + 0.056(X_4)^2 \\ + 5.2X_1X_2 + 19.6X_1X_3 + 3.11X_1X_4 - 25.5X_2X_3 - 5.66X_2X_4 + 8.42X_3X_4 + 247$$

Mass loss (% wt.)

$$= 600X_1 - 357X_2 + 187X_3 + 99.2X_4 + 44.8(X_1)^2 - 12.0(X_2)^2 + 32.3(X_3)^2 - 1.33(X_4)^2 \\ - 52.1X_1X_2 - 37.5X_1X_3 - 21.2X_1X_4 + 64.6X_2X_3 + 12.92X_2X_4 - 10.0X_3X_4 - 1637$$

Where (X)'s are the uncoded terms and (X₁), (X₂) and (X₃) are the dosages of WRA, VMA and HCA, respectively, and (X₄) is the percentage of L/C (by wt.).

From the prediction models, it can be said that HCA had the greatest influence on the permeability (254) followed by VMA (-216.6), WRA (166) and L/C (67.7). That is, a 1 mL increase in HCA per 1 lb cement increased the permeability by a factor of 254. The negative coefficient of VMA means a reduction of the permeability with an increase of VMA. HCA also has the greatest influence (-200) on the compressive strength, followed by VMA (164.1) and WRA (-91). The interactions of VMA and HCA (-25.5) and WRA and HCA (19.6) and the quadratic effects of HCA (-17.7) and WRA (-11.6) had a greater influence on the compressive strength than L/C (-10.4). For the mass loss, WRA dosage influenced the most (600) followed by VMA (-357), HCA (187) and L/C (99.2).

According to the D-optimal desirability functions in Minitab 17, the 14-day hardened, pervious concrete was predicted, with a composite desirability of 0.71, to have a permeability at 11.7mm/s, a compressive strength at 17.1 MPa, and a mass loss at 43.0% with an optimum mix proportion of 0.90mL WRA, 0.60mL VMA, 1.56 mL HCA (all per 1 lb cement), and L/C at 29.2% including the liquid coloring admixture/C at 5% (by wt.).

In order to validate the accuracy of the prediction model, the pervious concrete mix was made with the aforementioned optimum mix proportions and tested for the responses. As shown in **Fig. 5**, the 14-day hardened validation specimens (n = 3) had a permeability of 10.4 ± 1.6 mm/s, a compressive strength of 10.7 ± 3.2 MPa and a mass loss at 43.0 ± 1.0%. Therefore, it is believed that the models generally are accurate and predict the responses well. These values of the responses were in good agreement with the reported ones (Marines-Muñoz, 2012; ACI, 2010).

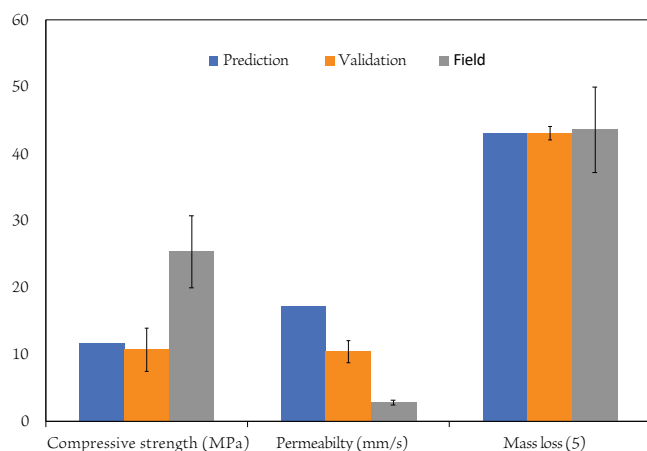


Fig. 5. Comparison of the 14-day hardened, field pervious concrete sampled during the construction ($n = 9$) and the 14-day hardened, optimized pervious concrete predicted by the statistical models and obtained from the validation ($n = 3$). Both the field and laboratory validation pervious concrete had an optimum mix proportion of 0.90mL WRA, 0.60mL VMA, 1.56 mL HCA (all per 1 lb cement), and L/C at 29.2% including 5% liquid coloring admixture/C (by wt.).

A long-term compressive strength development was assessed with the pervious concrete specimens made of the aforementioned optimum mix proportion. As shown in Fig. 6, the compressive strength increased with an increase in the curing time. After 90 days of curing, the pervious concrete had a compressive strength of 18.1 MPa which is a ~80% increase from the 14-day compressive strength of 10.7 MPa.

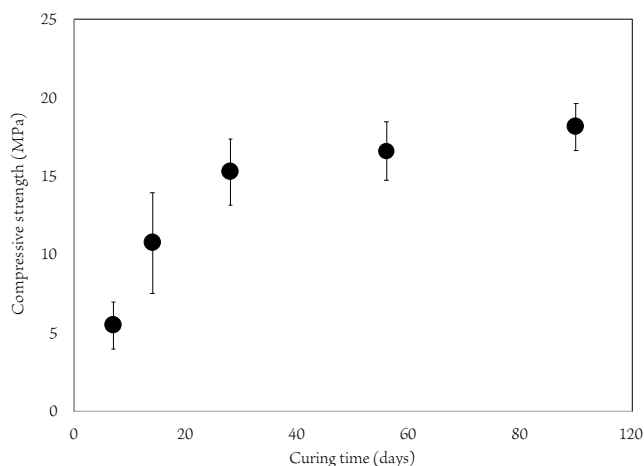


Fig. 6. Development of the compressive strength of pervious concrete made of the optimized mix proportion of 0.90mL WRA, 0.60mL VMA, 1.56mL HCA (all per 1 lb cement), and L/C at 29.2% including 5% liquid coloring admixture/C (by wt.).

3.4. Contour plots

The effect of the two chemical admixtures on the property of pervious concrete was illustrated by the contour plots while the other two chemical admixtures were held at their optimum levels (Fig. 7). In general, a greater the compressive strength, a lower the permeability and mass loss was observed, which was also shown in Fig. 4. However, dissimilar patterns of the effect were observed depending on the combination of the chemical admixtures, as described below.

An increase of VMA dosage and a decrease of WRA dosage at the same time made the compressive strength decreased but the permeability and mass loss increased (Figs. 7a - 7c). A simultaneous increase of both VMA and HCA dosages reduced the compressive strength but increased the mass loss, while the permeability was generally decreased with an increase of VMA dosage and a decrease of HCA dosage at the same time (Figs. 7d - 7f). For WRA and HCA, a greater compressive strength and durability was achieved with a decrease of WRA dosage and an increase of HCA dosage, whereas a greater permeability was found with both WRA and HCA dosages being decreased (Figs. 7g - 7i). When the HCA dosage was greater than ~1.1mL per 1 lb cement, an increase of L/C increased the compressive strength and decreased the permeability and mass loss. In contrast, when the HCA dosage was lower than ~1.1mL per 1 lb cement, an increase or a decrease of L/C did not affect the responses (Figs. 7j - 7l). For a greater compressive strength, a lower VMA dosage was needed with an increase of L/C. But, it should be noted that such a combinational dosage also decreased the permeability. At a given VMA dosage, an increase of L/C did not substantially affect the mass loss. Nevertheless, a lower mass loss was achieved with a lower VMA dosage and a higher L/C (Figs. 7m - 7o). In case of the WRA and L/C combination, an increase of WRA dosage did not significantly affect the compressive strength and mass loss at a given L/C, whereas an increase of L/C increased and decreased the compressive strength and mass loss, respectively, at a given WRA dosage. A simultaneous decrease of the WRA dosage and L/C resulted in increase of the permeability (Figs. 7p - 7r).

The aforementioned phenomena clearly disclosed that the properties of pervious concrete were greatly affected by the dosage, type and combination of the chemical admixtures, which is in good agreement with the results of Jimma & Rangaraju (2015) who proved significance of combinational interaction effects of VMA and HCA admixtures on the thickness of pervious concrete paste.

Therefore, it is recommended to find an optimum dosage of individual or combinational chemical admixture(s) to ensure good quality of pervious concrete, instead of simply adding the chemical admixtures based on the vendor's recommendations. In case when multiple chemical admixtures are used, an experimental design such as the CCD used in the current study will certainly help to reduce the number of trials while obtaining a pervious concrete mix design with proper workability for successful placement and with desired properties of strength, durability and permeability.

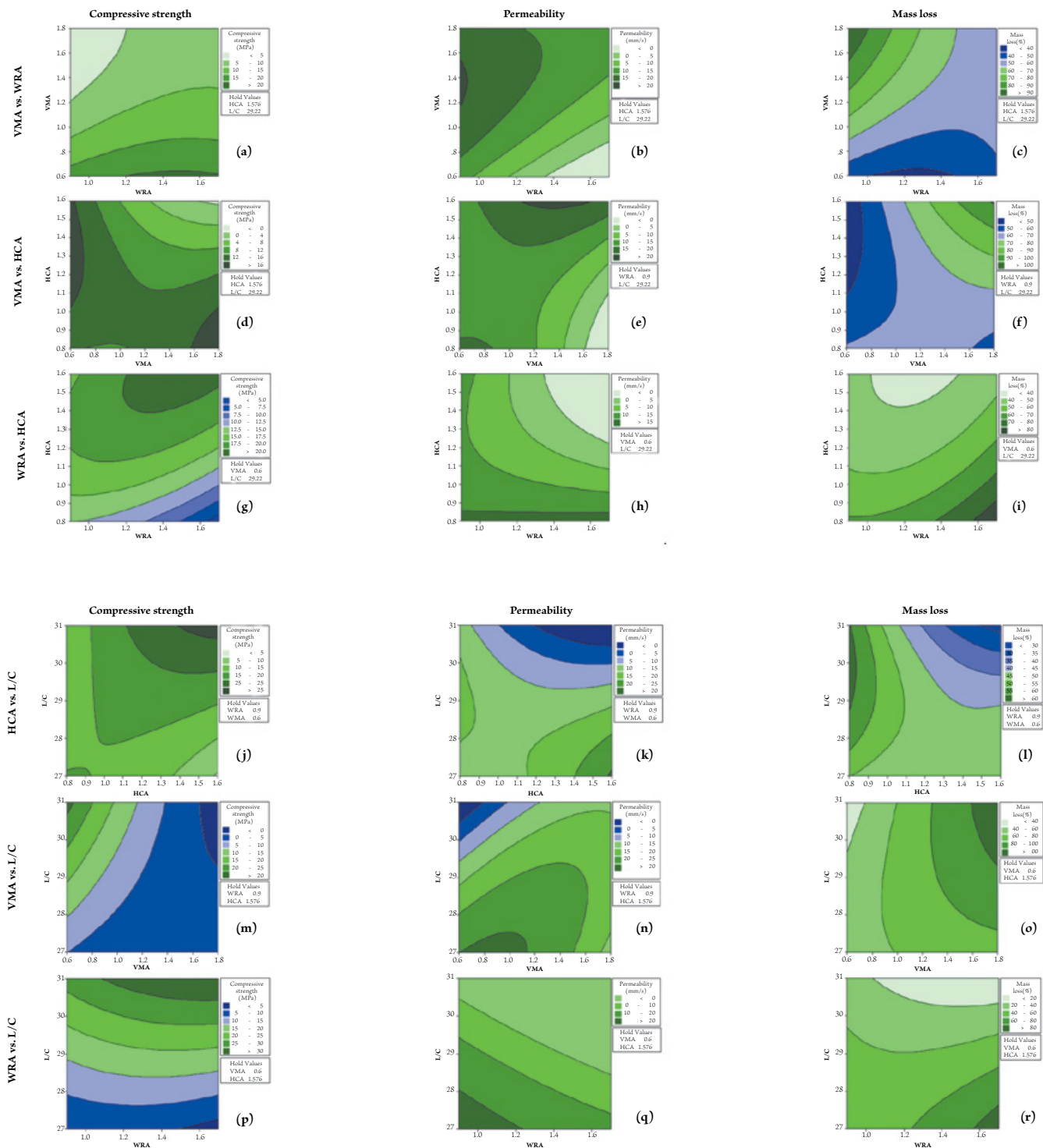


Fig. 7 Contour plots showing the effect of two factors on the responses while two other factors were held at their optimum levels.

3.5. Field construction of pervious concrete pavement

Pervious concrete mix was prepared at a local ready mix concrete plant 20 minutes away from the site. It should be noted that the university students were the main workers for the pervious concrete construction. Prior to the construction, they were trained in the installation procedure and method by the pervious concrete professionals certified by the National Ready Mix Concrete

Association. Also, the same certified professionals were present at the site on the construction days for quality control and quality assurance.

The Area 1 (160m²) and the Area 2 (160m²) were constructed with four mix trucks each on different days. Each truck (8m³ in capacity) was prepared for 5m³ pervious concrete mix in it. **Table 6** shows the pervious concrete mix proportions in each truck based on the optimized mix design.

Table 6. Pervious Concrete Mix (5 m³) prepared in each mix truck (8m³ in capacity) based on the optimized mix design.

	Optimized mix		Truck mix (5 m ³ pervious concrete)	
	unit	value	unit	value
Cement	kg/m ³	360	kg	1,800
Coarse aggregate		1,440		7,200
WRA	mL per 1lb cement	0.90	L	3.6
VMA		0.60		2.4
HCA		1.56		6.2
Liquid color	%wt. of cement	5.0	L	49.8
Tap water		24.4		435.6
Total liquid		29.2		485.4

All the pervious concrete mixes were poured from the trucks and placed within an hour from the initial mixing at the ready mix concrete plant. A motorized roller screed was used for the compaction of the pervious concrete slab. A cross-roller and edgers were used for the surface finishing. A 6-mil polyethylene sheet was used to cover the installed pervious concrete for the 14-day curing period.

3.6. Characteristics of the field pervious concrete

During the construction, the field pervious concrete mixes were cast in the mold, cured and tested in the same manner that the optimized pervious concrete mix was. Results showed a greater compressive strength of 25.3 ± 5.4 MPa ($n = 9$) but a lower permeability of 2.8 ± 0.4 mm/s ($n = 9$) for the field pervious concrete than the optimized pervious concrete (Fig. 5). However, the field pervious concrete had a mass loss of $43.6 \pm 6.4\%$ ($n = 9$) similar to the optimized pervious concrete (43%). A plausible explanation for this difference may include, but is not limited to, the field condition of the coarse aggregates that apparently had more debris (i.e., fine particles). It is known that the addition of fine aggregates (i.e., sand) to the pervious concrete mix provided an increase of the mechanical strength and a consequent decrease of the permeability (Bonicelli et al., 2015).

3.7. Handicap accessibility and environmental friendliness of the site

The public plaza is now more handicap accessible with stable, leveled, firm and slip-resistant pervious concrete surface (Fig. 8). According to the ADA Standards (ADA, 2010), the handicap accessible surface should have changes in level and openings no greater than 6.35 mm and 12.7 mm, respectively. The pervious concrete pavement placed the public plaza in compliance with these requirements. Since the construction, no standing water on the pervious concrete pavement at the public plaza has been found. This improvement also complies with the ADA Standards of no water accumulation on walking surfaces (ADA, 2010).

With regard to stormwater management, the water retention capacity of the pervious concrete public plaza was

calculated to be 9 m³ for the Area 1 and 12 m³ for the Area 2, totaling 21 m³ for the public plaza based on the void contents of the pervious concrete slab (20%) and subbase water storage layer (38%). However, it should be noted that the net water retention capacity of the Area 1 is lower than the calculated one due to the fact that it was constructed with a partial infiltration design (Fig. 1a).

As far as the authors know, there is no published runoff coefficient of pervious concrete pavement at the moment. However, it is believed that pervious concrete slab would have a runoff coefficient in a range of 0.1 to 0.3, which is substantially lower than a runoff coefficient of 0.75 to 0.95 for a typical impervious pavement. Therefore, a low runoff coefficient of the pervious concrete slab would elongate the time of concentration and, therefore, reduce the peak flow rate in the downstream (Mays, 2010). A further hydrologic study is recommended to elucidate the aforementioned environmental benefit of stormwater runoff reduction in the downstream.

According to Chandrappa & Biligiri (2016), pervious concrete pavement is one of sustainable, low impact development tools as it inclusively aims for stormwater management, livability improvement, and safety enhancement. The public plaza renovation with pervious concrete pavement clearly demonstrated handicap and environmental friendliness of the site in good agreement with sustainable development while meeting the ADA requirements.



Fig. 8. Comparison views of before (left column) and after (right column) the construction of handicap accessible and environmentally friendly pervious concrete pavement on the public plaza.

4. Conclusions

In this study, the pervious concrete mix was optimized for the permeability, compressive strength, and mass loss with three different chemical admixtures of WRA, VMA and HCA. The optimized pervious concrete mix was then used for the renovation of a public plaza. The following conclusions can be drawn:

- The 14-day hardened optimized pervious concrete was predicted to have a permeability of 11.7mm/s, a compressive strength of 17.1 MPa, and a mass loss of 43.0% with the dosage of WRA at 0.90mL, VMA at 0.60mL, and HCA at 1.56mL (all per 1 lb cement) and the mass percentage of liquid-to-cement at 29.2% including the liquid coloring admixture at 5.0%.
- The main, interactive, and quadratic terms made a statistically significant influence on the permeability prediction, whereas they did not on the predictions of the compressive strength and mass loss, most likely due to a short curing time of 14 days. The prediction models generally fit the data well, based on the Lack-of-Fit and the coefficient of determination (R^2).
- The properties of pervious concrete were greatly affected by the dosage, type and combination of the chemical admixtures which typically added to the mix to improve flowability, stability and workability.
- The retention capacity of the public plaza was calculated to be 21m³ combining the partial-infiltration Area 1 and the full-infiltration Area 2. However, a net retention capacity is actually smaller than the calculated one as the Area 1 drains some of the stored water out via the underdrain pipe. With the infiltration of stormwater runoff at the renovated public plaza, the time of concentration would be lengthened so as to reduce the peak discharge rate in the downstream.
- Prior to the construction, the public plaza with square concrete pavers was neither stable, leveled nor handicap accessible, in addition to the lippage, wide gaps and standing water on the pavement. In comparison, since the renovation with pervious concrete pavement, the public plaza has been serving as a more handicap accessible and environmentally friendly area with improved livability and safety and, at the same time, enhanced stormwater runoff management.

Acknowledgements

We appreciate the workers of the Construction Division at the University of Puerto Rico at Mayagüez for initial site preparation, formwork and bench construction. Our appreciation extends to Argos San Juan Cement for their contribution to the project with Type IS cement.

References

ACI (2010). *Report on pervious concrete*, 1st ed., American Concrete Institute Committee 522, ACI 522R-10. American Concrete Institute, Farmington Hills, MI.

ADA (2010). *ADA Standards for Accessible Design*. Civil Rights Division, Department of Justice, Washington, DC.

Bonicelli, A., Giustozzi, F., & Crispino, M. (2015). "Experimental study on the effects of fine sand addition on differentially compacted pervious concrete." *Constr. Build. Mater.* 91, 102-110.

Chandrappa, A.K., & Biligiri, K.P. (2016). "Pervious concrete as a sustainable pavement material – Research findings and future prospects: A state-of-the-art review." *Constr. Build. Mater.* 111, 262-274.

Erickson, W., Lee, C., & von Schrader, S. (2018a). 2016 *Disability Status Report: United States*. Cornell University Yang-Tan Institute on Employment and Disability, Ithaca, NY.

Erickson, W., Lee, C., & von Schrader, S. (2018b). 2016 *Disability Status Report: Puerto Rico*. Cornell University Yang-Tan Institute on Employment and Disability, Ithaca, NY.

Hwang V., Masters A., Arocho M., & Hwang S. (2017). "Fly ash-amended pervious concrete pavement followed by bamboo bioretention basin with *Dracaena sanderiana* for urban stormwater runoff control." *Constr. Build. Mater.* 132, 161-169.

Jimma, B.E., & Rangaraju, P.R. (2015). "Chemical admixtures dose optimization in pervious concrete paste selection – A statistical approach." *Constr. Build. Mater.* 101, 1047-1058.

Koehler, E., Offenberger, M., Malone, J., & Jeknavorian, A.A. (2009). *Chemical admixture system for pervious concrete*, American Concrete Institute Special Publication 262-20, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI.

Łażniewska-Piekarczyk, B. (2013). "The influence of chemical admixtures on cement hydration and mixture properties of very high performance self-compacting concrete." *Constr. Build. Mater.* 49, 643-662.

Marines-Muñoz, A. (2012). *Evaluation of Sustainability, Durability and the Effect of Specimen Type in Pervious Concrete Mixtures*. Master Thesis, Texas State University, San Marcos, TX.

Mays, L.W. (2010). *Water Resources Engineering*, 2nd ed., John Wiley & Sons, Hoboken, NJ.

Montgomery, D. (2013). *Design and Analysis of Experiments*, 8th ed., John Wiley & Sons, Hoboken, NJ.

Sabnis, G.M. (2011). *Green building with concrete: sustainable design and construction*, 1st ed., CRC Press, Boca Raton, FL.

Authors

Sangchul S. Hwang*, PhD, PE, Rafael Terán-Rondón,

BSCE, Alesandra C. Morales-Vélez, PhD, EIT,

Department of Civil Engineering and Surveying,

University of Puerto Rico, Mayagüez;

Ruben Segarra-Montelala, BSCE, PE, McCarthy

Improvement Puerto Rico;

Juanchi Somoza López, Macro Mix Concrete;

Iván W. Ruiz-Vale, BSCE, EIT, BASF Agrochemical Products;

Efraín Daleccio, BSCE, PE, PROCAN.

* Corresponding author (S. Hwang), resource.recovery.pr@gmail.com, +1-787-265-3815

DICCIONARIO ZURDO

por Don Poco Sabe

Leyendo los artículos técnicos de esta edición de **Dimensión**, pasó por la mente de don Poco la idea de que los trabajos técnicos sobre experiencias en el uso de la tecnología sirven como “recetas” para otros **dimensionarios** para encontrar soluciones a problemas similares. Esto, junto al hecho que don Poco ha tenido que lidiar con conceptos y situaciones técnicas en **shakespeariano** y **cervantino**, muchas veces con la dificultad de encontrar los términos equivalentes con la mayor precisión posible, recordó a don Poco lo difícil que es también encontrar términos equivalentes cuando se trata de seguir recetas de cocina. Aquí hay una lista, obviamente no exhaustiva, de términos equivalentes en asuntos de cocina.



Shakespeariano	Definición	Cervantino
black pepper	Fruto del pimentero, redondo, de pequeño tamaño, picante y muy aromático, que se utiliza, molido o entero, como condimento.	pimienta
clove	Árbol tropical, de la familia de las mirtáceas, de unos seis metros de altura, copa piramidal, hojas opuestas, ovales, enteras, lisas y coriáceas, flores róseas en corimbo, con cáliz de color rojo oscuro y de cuatro divisiones, y por fruto drupa como la cereza, con almendra negra, aromática y gomosa. Los capullos de sus flores son los clavos de especia.	clavos de especia
parsley	Planta herbácea vivaz, de la familia de las umbelíferas, que crece hasta 70 cm de altura, con tallos angulosos y ramificados, hojas pecioladas, lustrosas, de color verde oscuro, partidas en tres gajos dentados, flores blancas o verdosas y semillas menudas, parduzcas, aovadas y con venas muy finas, que es espontánea en algunas partes y se cultiva mucho en las huertas, por ser un condimento muy usado.	perejil

pimiento, chili or pepper



chile o pimiento

Planta herbácea anual, de origen americano, de la familia de las solanáceas, con fruto en baya hueca, de color verde, rojo o amarillo y forma más o menos cónica. La variedad es amplísima, muchas de las variedades tienen un sabor picante a diferentes niveles. Hay una variedad **aguacatínica** que se conoce localmente como el ají caballero, que pica de verdad, y se usa en diferentes salsas. El ají más picante del mundo, sin embargo, se produce en **Gringalia**, y se conoce como el *Carolina Reaper*, o *Segador de Carolina*, arriba ilustrado (<https://www.telemundo.com/noticias/2016/08/25/el-chile-mas-picante-del-mundo-es-mexicano>).

scallions or green onions	Cebollas tiernas con sus hojas, identificables por ser delgadas (1/2") con tallo blanco y raíces fibrosas, y con un sabor suave.	cebollines
---------------------------	--	------------

rutabaga	Planta bienal de la familia de las crucíferas, de 40 a 60 cm de altura, con hojas grandes, ásperas, gruesas, rugosas, las radicales partidas en tres lóbulos oblongos, y enteras y lanceoladas las superiores; flores pequeñas, amarillas, en espiga, fruto seco en vainillas cilíndricas con muchas semillas menudas, esféricas, de color parduzco y sabor picante, y raíz carnosa, muy grande, amarillenta o rojiza, esferoidal o ahusada, según las variedades.	naba, nabo sueco
shallot	Planta muy parecida a la cebolla, con el bulbo pequeño, dividido en forma parecida al del ajo, y alargado, y parte de las hojas comestibles.	cebolleta
turnip	Planta anual de la familia de las crucíferas, de 50 a 60 cm de altura, con hojas glaucas, rugosas, lampiñas, grandes, partidas en tres lóbulos oblongos las radicales, y enteras, lanceoladas y algo envainadoras las superiores, flores en espiga terminal, pequeñas y amarillas, fruto seco en vainillas cilíndricas con 15 o 20 semillas, y raíz carnosa, comestible, ahusada, blanca o amarillenta.	nabo

Y continuaremos en una próxima edición, pues en esta edición impresa de la revista **Dimensionaria** el espacio está obviamente limitado. Si algún lector desea que don Poco incluya la traducción de algún otro ingrediente o condimento, puede comunicarse con los editores de **Dimensión** quienes harán llegar su comunicación a don Poco.

Si usted también necesita algún término técnico traducido, con mucho gusto don Poco le sugerirá una traducción precisa o, por lo menos, una buena aproximación.

Nota: Definiciones adaptadas del **Mataburros de la Real Academia Cervantina**



CARENTEC
D-9 Villa Beatriz, Manatí PR, 00674
tel. (787)884-0497 / 3355
fax. (787)854-7241

Our experience and proficiency makes us the **BEST HVAC SOLUTIONS PROVIDER** in Puerto Rico

Our Services include:

- TAB**
Testing and Balancing of HVAC and Hydronic Systems
- CPT**
Cleanroom Certification (ISO 14644)
HEPA testing and certification
- Commissioning and Validation**
of HVAC, USP Water, and Facilities
- HEPA testing and certification**

NEBB
Certification Nos. 3291 CR167



TRULY NOLEN

Industrial Commercial Residential

Pest and Termite Control services.

We enjoy and use our License to Kill:

- *Rodents * Roaches * Ants *
- *Flies *Mosquitoes* Termites *
- *and many other pests, including Dengue, Chikungunya & Zika vectors.

**Good citizens.
Ruthless exterminators!**

787-778-2950
787-778-2930 fax
Email: trulynolenpr@hotmail.com
WWW.TRULYNOLENPUERTORICO.COM





DURASEAL ROOFING

***“Setting The Standard In
Roofing For 25 Years”.***

wendy@durasealroofing.com
787.360.0306

CLEAN AIR CONTRACTORS

¡LA SOLUCIÓN IDEAL PARA NEGOCIOS!

SISTEMAS VRF DE AIRE ACONDICIONADO

**MILES DE \$\$\$\$\$\$
AHORRADOS**

 CleanAirContractorsPR
 cleanaircontractorspr


LA COMPAÑÍA IDEAL

787-855-4869

sales@cleanaircontractors.com

Instalamos VRF marcas:



BECAUSE THE WORK MUST GO ON



GENERATORS

Industrial, Commercial and Residential
Sales - Rentals - Part - Maintenance - Contracts



THE POWER OF ENERGY

www.antillespower.com

Tel. 787-622-9330

Service 24/7 787-774-7936