



## Resumen

Este proyecto presenta el desarrollo de una herramienta de apoyo a la toma de decisiones en Excel, orientada a optimizar la asignación de brigadas de restauración tras eventos atmosféricos severos en Puerto Rico. El modelo utiliza criterios cuantificables como la cantidad estimada de clientes afectados, los daños en infraestructura y la accesibilidad geográfica para calcular puntajes de prioridad por región y guiar la distribución de recursos. Mediante una macro en VBA integrada en Microsoft Excel, el usuario puede ingresar los datos y ejecutar Solver automáticamente, generando una asignación que busca igualar los tiempos de restauración entre regiones, con el fin de restablecer el sistema eléctrico de manera coordinada y simultánea. Los resultados de simulación evidencian una asignación más equilibrada y eficiente en comparación con enfoques tradicionales o manuales, lo que respalda su potencial integración en planes de respuesta ante emergencias.

## Introducción

Debido a su ubicación geográfica en el Caribe, Puerto Rico se encuentra en una zona de alta exposición a tormentas tropicales y huracanes, lo que ha provocado que la isla enfrente situaciones críticas que ponen en riesgo su infraestructura esencial. Casos como el huracán María en 2017 y la tormenta Ernesto evidenciaron la vulnerabilidad del sistema eléctrico, afectando a cientos de miles de residentes y servicios críticos. La restauración del servicio eléctrico, especialmente en las líneas de transmisión de alto voltaje, es una prioridad tras eventos de esta magnitud, pero lograr una respuesta ágil sigue siendo un reto debido a la magnitud de los daños, las condiciones geográficas, la falta de planificación dinámica y la escasez de personal especializado. Actualmente, muchas decisiones sobre la distribución de brigadas se toman con base en experiencia empírica, limitando la eficiencia operativa. Este proyecto propone una herramienta digital en Microsoft Excel que apoye la toma de decisiones mediante un modelo estructurado de priorización, basado en criterios como cantidad de clientes sin servicio, infraestructura crítica, accesibilidad y riesgo climático, ponderados según su importancia, e integrando datos históricos y simulaciones de eventos reales.

## Revisión de Literatura

Los huracanes Georges (1998) y María (2017) expusieron la fragilidad del sistema eléctrico puertorriqueño, causando cortes masivos, pérdidas humanas y graves daños económicos, lo que evidenció la necesidad urgente de fortalecer su resiliencia [1]. Estudios sobre la frecuencia e intensidad de eventos atmosféricos en la isla han resaltado la importancia de implementar estrategias basadas en datos cuantitativos para priorizar recursos y adaptar las respuestas a las características de cada región [2]. Organismos como FEMA han impulsado la modernización de infraestructuras críticas y la implementación de planes resilientes mediante inversiones estratégicas [3]. A su vez, el COR3 ha documentado los daños tras los huracanes Irma y María, señalando retrasos en la restauración eléctrica vinculados a fallas logísticas, escasez de brigadas y ausencia de criterios objetivos [4]. Finalmente, tanto análisis técnicos como sociales han coincidido en que la falta de coordinación y preparación previa a María agravó el impacto, reafirmando la necesidad de herramientas de planificación automatizadas como la propuesta en este proyecto [5].

## Metodología

La metodología del proyecto consistió en identificar criterios clave como daño, densidad poblacional, accesibilidad y duración histórica de interrupciones para diseñar una herramienta que atendiera prioridades reales. Se recopilaron datos históricos de tormentas en Puerto Rico, como el huracán María, y se organizaron para definir variables cuantificables. Se desarrolló una herramienta interactiva en Excel con fórmulas predefinidas y ponderaciones específicas (40% severidad, 35% población, 25% acceso), integrando también el complemento Solver junto con macros en VBA para automatizar el proceso de optimización en la asignación de brigadas. La herramienta fue evaluada mediante escenarios hipotéticos basados en eventos reales, y se realizaron ajustes para mejorar su precisión y facilidad de uso. Finalmente, se planteó un enfoque de mejora continua para asegurar su adaptación a las necesidades futuras del sistema eléctrico.

## Resultados y Discusión

Durante la implementación de la herramienta en Excel, se realizaron múltiples simulaciones con el objetivo de validar la efectividad del modelo de asignación optimizada de brigadas. El propósito central fue lograr una distribución equitativa del tiempo de restauración entre las distintas regiones, promoviendo una recuperación sincronizada del sistema eléctrico que evitara que algunas zonas se restablecieran por completo mientras otras permanecieran sin servicio por largos periodos. Esta estrategia busca una restauración más efectiva y coherente desde el punto de vista operativo. Para alimentar el modelo, se utilizó la información histórica del huracán María, detallada en la Tabla 1, la cual presenta datos por región como clientes afectados, daños y accesibilidad. Estos datos fueron normalizados y organizados en la Tabla 2, sirviendo como base para calcular el puntaje de prioridad que guió la asignación estratégica de brigadas.

Tabla 1  
Data Histórica del Huracán María

REGIÓN	CLIENTES	DAÑOS	ACCESO
SAN JUAN	250,000	95%	5
BAYAMÓN	200,000	90%	4
CAROLINA	180,000	85%	4
CAGUAS	170,000	80%	3
ARECIBO	160,000	75%	3
PONCE	150,000	70%	3
MAYAGÜEZ	140,000	65%	2
HUMACAO	130,000	60%	2

Tabla 2  
Data Histórica del Huracán María Normalizada

REGIÓN	CLIENTES	DAÑOS	ACCESO	PUNTAJE
SAN JUAN	1	1	1	1
BAYAMÓN	0.8	0.95	0.80	0.86
CAROLINA	0.72	0.89	0.80	0.81
CAGUAS	0.68	0.84	0.60	0.72
ARECIBO	0.64	0.79	0.60	0.69
PONCE	0.60	0.74	0.60	0.65
MAYAGÜEZ	0.56	0.68	0.40	0.57
HUMACAO	0.52	0.63	0.40	0.53

Posteriormente, se utilizó el complemento Solver de Microsoft Excel para optimizar la asignación de brigadas, con el objetivo de igualar los tiempos de restauración entre regiones en lugar de minimizarlos de forma individual. Esta estrategia responde a una lógica de coordinación sistémica, promoviendo una recuperación uniforme del sistema eléctrico que evite desigualdades severas entre regiones con distintos niveles de impacto. La experiencia del huracán María, donde el enfoque tradicional provocó retrasos de hasta 9.5 meses en algunas zonas por priorizar solo ciertas regiones, justificó este cambio. Al equilibrar los tiempos de restauración, se busca una recuperación más eficiente y coherente a nivel isla. Para facilitar este proceso, se incorporó una macro en VBA que automatiza la ejecución del modelo: el usuario solo necesita ingresar los datos de clientes estimados, daños y accesibilidad por región, además de la cantidad total de brigadas disponibles. Al presionar un botón, la macro activa Solver automáticamente para generar la asignación óptima. Esta automatización mejora la usabilidad del modelo y lo hace viable en escenarios reales de toma de decisiones. La Figura 1 muestra la interfaz utilizada para configurar Solver dentro de la herramienta.

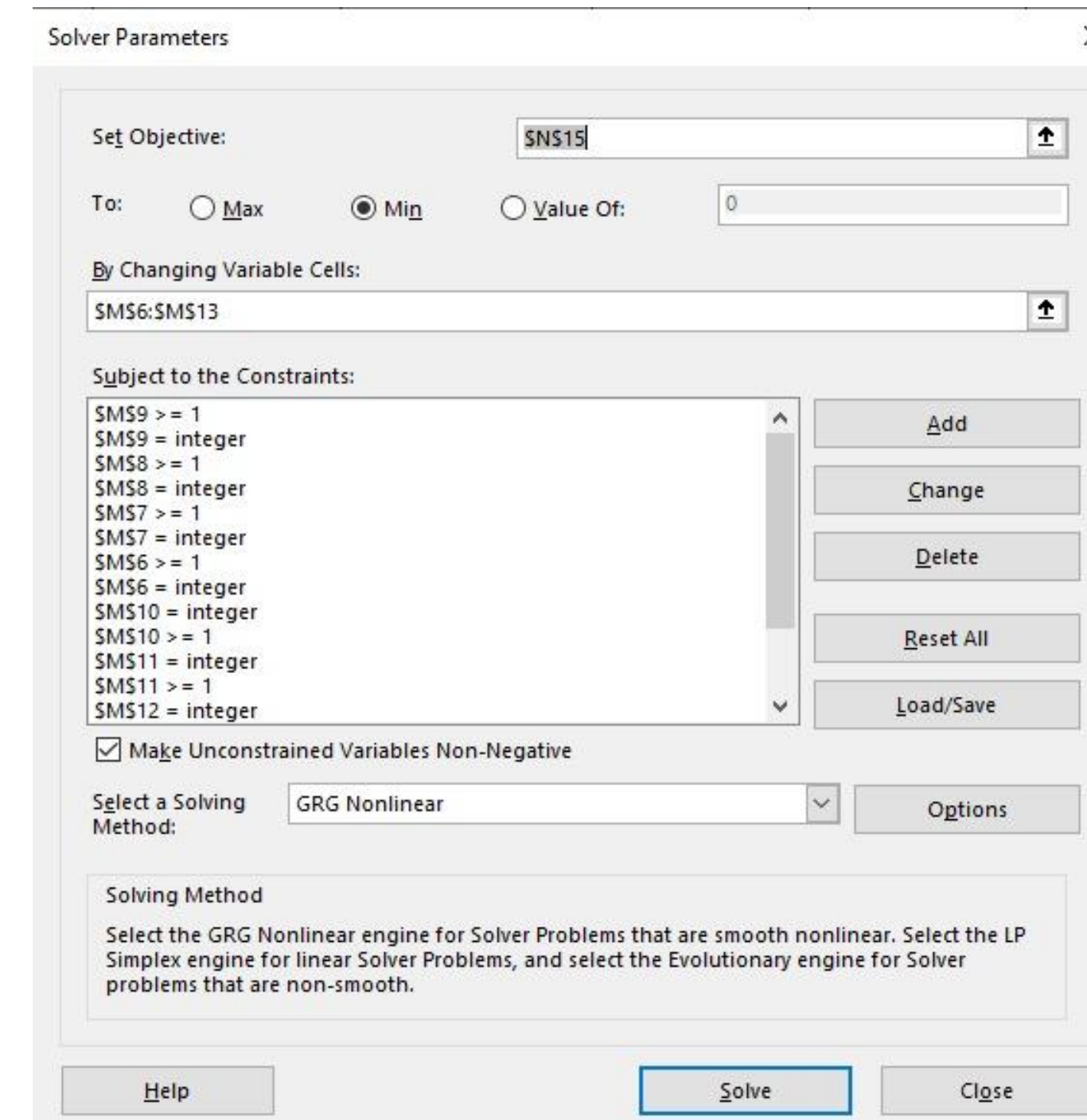


Figura 1

Ventana de configuración de Solver

La Tabla 3 compara los tiempos de restauración antes y después de aplicar la herramienta optimizada. Los resultados mostraron que la herramienta logró asignar los recursos de manera más eficiente que los métodos tradicionales al concentrar una mayor cantidad de brigadas en las regiones más prioritarias y lograr un tiempo de restauración uniforme en las ocho regiones. Aunque en algunos casos como San Juan el tiempo de restauración aumentó ligeramente (de 3.5 a 5.24 meses), esto se justifica porque el modelo prioriza la coordinación integral del sistema, asegurando que ninguna región se quede desproporcionadamente rezagada.

Tabla 3

Tiempo de Restauración Antes vs. Tiempo Optimizado

REGIÓN	TIEMPO EN MESES (ANTES)	TIEMPO EN MESES (DESPUÉS)
SAN JUAN	3.5	5.24
BAYAMÓN	4.5	5.24
CAROLINA	5	5.24
CAGUAS	6	5.24
ARECIBO	7	5.24
PONCE	7.5	5.24
MAYAGÜEZ	8.5	5.24
HUMACAO	9.5	5.24

## Conclusión

La herramienta desarrollada en Excel cumplió su objetivo principal de ofrecer un modelo accesible y funcional para priorizar la asignación de brigadas tras eventos atmosféricos severos en Puerto Rico. Utilizando criterios objetivos y una estructura adaptable, el modelo facilita decisiones más informadas por parte del personal de ingeniería y gestión. La integración del Solver junto con VBA permitió automatizar el proceso de optimización respetando las limitaciones reales de personal y capacidad operativa, mostrando flexibilidad ante cambios en la cantidad de brigadas disponibles y adaptabilidad a distintos escenarios regionales. Se plantea su integración en procesos de planificación y simulacros, así como su mejora continua mediante la incorporación de nuevos criterios o ajustes basados en eventos reales. Además, el modelo tiene potencial de ser replicado o adaptado a otras jurisdicciones con desafíos similares en la restauración de infraestructura crítica.

## Referencias

- [1] Telemundo Puerto Rico. (2023, 19 de septiembre). Huracanes más destructivos que han azotado a Puerto Rico. <https://www.telemundopr.com/noticias/puerto-rico/huracanes-mas-destructivos-puerto-rico/2486801/>
- [2] FEMA. (2024, 5 de febrero). FEMA reafirma su compromiso con un Puerto Rico más resiliente. <https://www.fema.gov/es/press-release/20240205/fema-reiterates-its-commitment-more-resilient-puerto-rico>
- [3] Metro Puerto Rico. (2017, 4 de septiembre). Tormentas y huracanes que pasaron por Puerto Rico. <https://www.metro.pr/pr/noticias/2017/09/04/tormentas-huracanes-pasaron-puerto-rico.html>
- [4] COR3. (s.f.). Huracanes Irma y María. Portal de Transparencia. <https://recovery.pr.gov/es/huracanes>
- [5] El Nuevo Día. (2017). Huracán María: nuestras coberturas especiales. <https://huracanmaria.elnuevodia.com/>