

Cambios en la Vulnerabilidad de Inundación Debido al Desarrollo Urbano

Coralys M. Ayala González

Maestría en Ciencia y Tecnología Geoespacial

Mentor: Dr. Raúl Matos Flores

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental y Agrimensura

Universidad Politécnica de Puerto Rico

Resumen —Este artículo tiene como objetivo medir los impactos que nuevos desarrollos pueden generar en el entorno geográfico tomando como espacio de aplicación el barrio Espinar de Aguada, Puerto Rico. Este objetivo se buscará lograr utilizando Sistemas de Información Geográfica (SIG) y un análisis jerárquico de variables. A esto se suma la utilización de un modelo de inundación costera para tener un pronóstico de cómo se comportarán las inundaciones en la zona una vez alterado el espacio con el nuevo desarrollo. Se tomaron en consideración 5 variables las cuales son elevación, pendiente, precipitación, uso del suelo y TWI las cuales se analizaron y luego ponderaron para realizar el análisis multivariable. Luego de completados los modelos se pudo determinar que la incorporación de un nuevo desarrollo urbano en el área tendría un resultado negativo en la vulnerabilidad de inundación debido a que aumentaría a mayores áreas con una vulnerabilidad de moderada a alta. de igual manera se vería más áreas de terreno afectadas en caso de inundación afectado así aún más a la comunidad.

Palabras Claves —análisis multicriterio, GIS, inundación, vulnerabilidad, zonas inundables.

INTRODUCCIÓN

Se puede aseverar que en la actualidad se vive en espacios urbanos sumamente densos ya que más de un 50% de la población vive en zonas urbanas. En la medida que las ciudades continúan creciendo, las presiones de desarrollo de nuevas áreas urbanas crean una mayor concentración de personas y activos que en caso de ocurrir un desastre natural potencial de devastación es mayor. Un creciente desequilibrio entre el entorno natural y humano ha llevado a mayores riesgos de inundaciones en las principales ciudades [1]. Los cambios en los usos del suelo durante el crecimiento urbano han creado que ciertos

terrenos sean más propensos a desastres naturales. Las inundaciones en lugares urbanos constituyen un riesgo significativo y se han vuelto más frecuentes y severas junto con el rápido desarrollo urbano.

La urbanización a lo largo de las riberas de los ríos ha contribuido al aumento del riesgo, la gravedad y la frecuencia de las inundaciones [2]. Esto ocurre por distintas razones entre ellas el que los cambios en el uso del suelo asociados con el desarrollo urbano afectan las inundaciones de muchas maneras. La eliminación de la cubierta vegetal y el suelo, la nivelación de la superficie del terreno y la construcción de redes de drenaje aumentan la escorrentía de las lluvias [3]. Debido a que los materiales impermeables pavimentados bloquean la penetración natural del agua, lo que reduce la tasa de infiltración en la superficie [4]. Las consecuencias comunes del desarrollo urbano son el aumento de la descarga máxima y la frecuencia de las inundaciones. Por lo general, la descarga máxima anual en un arroyo aumentará a medida que se produzca el desarrollo urbano, aunque el aumento a veces queda enmascarado por una variación sustancial de las tormentas de un año a otro [3].

Puerto Rico es una isla que tiene una probabilidad de inundaciones bastante alta. Las inundaciones son más frecuentes en los meses de junio a noviembre, debido a que es la época más lluviosa del año, pero pueden ocurrir en cualquier momento como consecuencia de algún fenómeno atmosférico que deje un alto volumen de lluvia en un corto periodo de tiempo. El daño periódico de las inundaciones en los terrenos agrícolas, la infraestructura y las estructuras es significativo. El rápido crecimiento y desarrollo urbano ha resultado en gran erosión de suelos, sedimentación de cuerpos de agua, problemas de drenajes y escorrentías urbanas afectando las cuencas hidrológicas. Al ajustar los procesos de planificación de desarrollos

urbanos al comportamiento de los ríos, y evitar que se construya en zonas que el río reclama como parte de su naturaleza se pueden lograr prevenir o mejorar las situaciones de inundación.

Esto se puede trabajar con la creación de mapas de vulnerabilidad y zonas de peligro de inundación. Estos mapas brindan información a los habitantes del área propensa a inundaciones sobre las posibles consecuencias de las inundaciones. Los mapas de zonificación de peligros de inundación se pueden utilizar como una herramienta eficaz para minimizar los daños mediante el establecimiento de un sistema adecuado de protección, advertencia y evacuación de inundaciones. La implementación del sistema de protección contra inundaciones puede ayudar potencialmente a mitigar los peligros inducidos por inundaciones y controlar la pérdida de vidas humanas/animales, así como las pérdidas económicas dentro de las áreas propensas a inundaciones. Como la lluvia es un fenómeno natural, la ocurrencia de futuros desastres por inundaciones no se puede prevenir por completo. Sin embargo, la magnitud del impacto puede reducirse mediante el desarrollo de medidas adecuadas de mitigación y gestión de inundaciones [5]

OBJETIVOS

Puerto Rico al ser una isla es muy propenso a inundaciones costeras o por precipitación. Hay varios factores que influyen en la vulnerabilidad de inundación y como parte de esta investigación se busca demostrar uno de ellos. Mediante la investigación se busca identificar qué cambios ocurrirán en la vulnerabilidad a inundación de un área en específico y el cambio en áreas inundadas si en un área en específica se realiza un nuevo desarrollo urbano cambiando así la morfología del terreno. Se busca determinar qué cambios ocurrirían y cómo afectaría si se realiza el nuevo desarrollo urbano. Esto podría ayudar en la toma de decisiones, sobre si es conveniente o no llevar a cabo desarrollos urbanos en distintas áreas.

REVISIÓN DE LITERATURA

En la realización de esta investigación se tomaron como referencia varios casos de estudio. Estos casos de estudio tratan sobre la investigación de vulnerabilidad y riesgo de inundación de distintas áreas utilizando métodos de análisis jerárquico de multi criterio mediante Sistemas de Información Geográfica. Abordar el problema del impacto del crecimiento urbano en los riesgos de inundaciones requiere un enfoque multicriterio que involucre varios y diferentes elementos, condiciones y factores. Este enfoque, cuando se asocia con el Sistema de Información Geográfica (SIG), ha sido ampliamente utilizado en diferentes áreas contextuales, incluida la gestión de inundaciones [2].

El objetivo primordial de estos casos era la realización de mapas de vulnerabilidad o riesgo de inundaciones para sus áreas de estudio las cuales son; M'sila, Argelia [2], Patna, Bihar, India [6] y Wadi Al-Mafraq, Jordania [7]. Esto para poder estudiar los riesgos de inundación del área, determinar la extensión de las áreas inundadas. Las técnicas utilizadas en estas investigaciones pueden y jugar un papel importante, no solo en términos de aplicaciones específicas para la gestión del riesgo urbano, sino también en la difusión oportuna de información a los actores públicos y privados involucrados en la prevención y gestión de este riesgo [2].

Para la realización de los objetivos de dichas investigaciones Loumi y Redjem adoptaron un método de análisis jerárquico de multi criterios donde tomaron en consideración la proximidad a un cuerpo de agua, densidad poblacional, uso del suelo y la pendiente de terreno y así luego de ponderar los criterios obtener su mapa de vulnerabilidad [2]. Con un enfoque mas en aguas subterráneas Gaurav y Singh tomaron un enfoque también de un análisis de multicriterio donde tomaron en consideración la geomorfología, LULC, suelo, densidad de drenaje, lluvia, DEM y la pendiente [6]. Por último, Alsukker, Al-Saleem y Etier tomaron en consideración seis factores para construir un mapa de riesgo de inundaciones en el área de estudio. Estos

factores incluyen: distancia de los canales principales, pendiente, elevación, uso de la tierra/cobertura de la tierra, lluvia y densidad de drenaje. Se asignaron diferentes pesos a cada criterio en función de su importancia, Luego se empleó MCDA para integrar estos criterios para evaluar el área de estudio en función de sus características de riesgo de inundación [7].

ÁREA DE ESTUDIO

Para el desarrollo de la investigación se seleccionó como área de estudio el Barrio Espinar en el municipio de Aguada, Puerto Rico. Del cual sus coordenadas son: 18°24'29"N 67°09'46"O y el cual tiene colindancia con el municipio de Aguadilla. Cuenta además con una superficie terrestre de aproximadamente 2.2 kilómetros cuadrados. La razón por la cual se selecciona esa área de estudio es debido a que este barrio sufre de inundaciones mayormente cuando la isla enfrenta fenómenos atmosféricos debido a ser un barrio costero y al estar rodeado de desembocaduras de cuerpos de agua como el Río Culebrina y el Caño Madre Vieja.



Figura 1
Localización del Área de Estudio

METODOLOGÍA

La metodología de esta investigación busca identificar los cambios en los patrones de inundación causados por un hipotético nuevo desarrollo urbano. Para esto se llevó a cabo un modelo de análisis multivariados con el cual se determinó la

vulnerabilidad a inundación actual y luego los cambios causados por el desarrollo simulado. Para esto se utilizaron, las variables elevación, pendiente, precipitación, uso del suelo y TWI o índice de humedad del terreno como criterios de evaluación. A esto se sumó un modelo de inundación costera para observar las áreas que quedan inundadas actualmente y luego del desarrollo urbano.

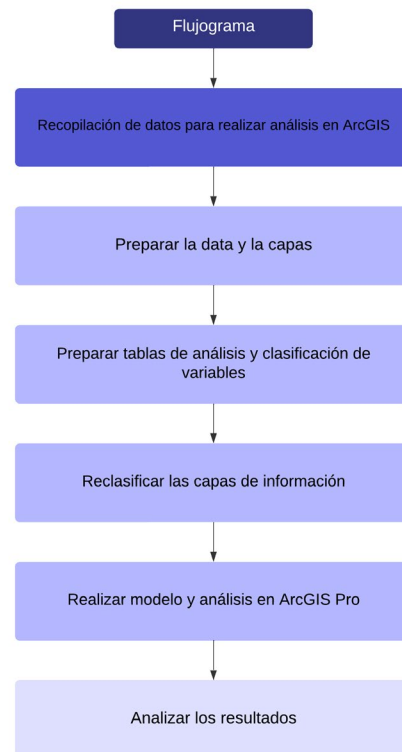


Figura 2
Flujograma de la Metodología

En la Figura 2 se puede observar los pasos adoptados para la presente investigación. El primero de estos pasos efectuado fue la recolección de la data necesaria para la ejecución de los modelos. Mediante la página de la NOAA (https://hdsc.nws.noaa.gov/hdsc/pfds/pfds_map_pr.html) se obtuvieron las capas de precipitación y DEM; con la capa DEM se trabajaron las variables de elevación, pendiente y TWI. De la base de geodatos del gobierno de Puerto Rico (<https://gis.pr.gov/Pages/default.aspxse>) se obtuvo la capa de usos del suelo. Luego utilizando el programa ArcGIS Pro, se estudiaron los datos para

posteriormente crear las tablas de pesos y clasificación de las variables. Cabe recalcar que primero se realizaran los modelos para el terreno actual y luego se realizaran los modelos para un hipotético desarrollo urbano en el área de estudio.

Luego de realizar el análisis de los datos se procedió a asignarle rangos y pesos a cada una de las variables. Cada variable se clasificó en 5 categorías donde el valor 1 se asignó a la de menor influencia en la posibilidad de inundación y 5 a la de posibilidad de influencia más alta. Al concluir con ese paso se procede a reclasificar cada una de las capas de variables con los rangos creados. Las clasificaciones y los pesos asignados se pueden observar en la Tabla 1.

Tabla 1
Clasificación y Peso de las Variables, Terreno Actual

flood criterio	unit	class	susceptibilidad range	class rating	weight (%)
TWI	level	1.68 - 2.99	very low	1	17
		3 - 5.33	low	2	
		5.35 - 8.29	moderate	3	
		8.3 - 11.7	high	4	
		11.8 - 29.7	very high	5	
elevation	m	1.5 - 0.06	very high	5	22
		0.059 - 1.6	high	4	
		1.7 - 2.7	moderate	3	
		2.8 - 3.7	low	2	
		3.8 - 7.1	very low	1	
slope	%	<2.50	very high	5	17
		2.51 - 4.50	high	4	
		4.51 - 6.50	moderate	3	
		6.51 - 8.50	low	2	
		8.51 - 70.2	very low	1	
precipitation	in/year	17.4 - 17.6	very low	1	22
		17.7 - 17.8	low	2	
		17.9 - 18	moderate	3	
		18.1 - 18.2	high	4	
		18.25 - 18.3	very high	5	
uso del suelo	level	SREP-A	very low	1	22
		SREP	low	2	
		SREP-E	moderate	3	
		VIAL	high	4	
		SU	high	4	
AGUA	very high	5			

Luego de reclasificadas las variables (figura 3 y 4), se continuo con la creación del modelo utilizando la herramienta “weighted overlay” para la unión de todas las capas con sus distintos pesos con el cual se obtuvo el mapa de vulnerabilidad de inundación del área estudiada.

Completado el modelo de vulnerabilidad a inundación se procedió a ejecutar el mismo, pero incluyendo el desarrollo urbano hipotético. Para esto primero se seleccionó un área de terreno donde se localizará el hipotético desarrollo urbano. Dado que el desarrollo implica un cambio en la elevación del terreno, se procedió a modificar la elevación de la zona a un metro.



Figura 3
Reclasificación: A) Elevación B) Pendiente

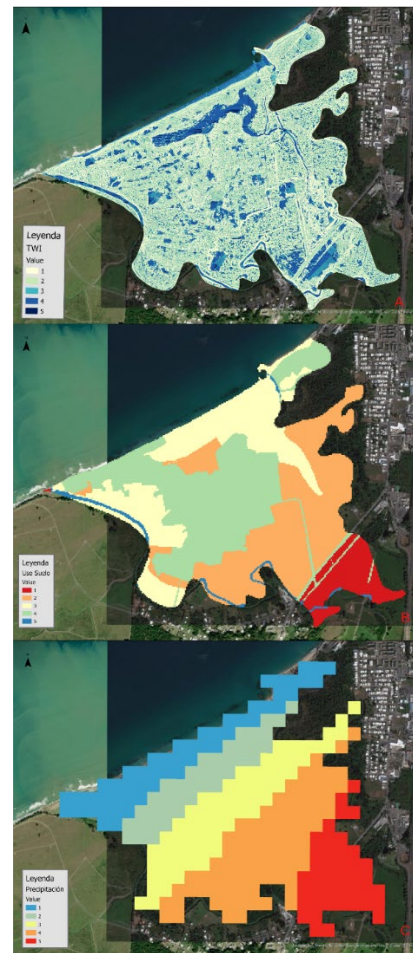


Figura 4
Reclasificación: A) TWI B) Uso de Suelo C) Precipitación

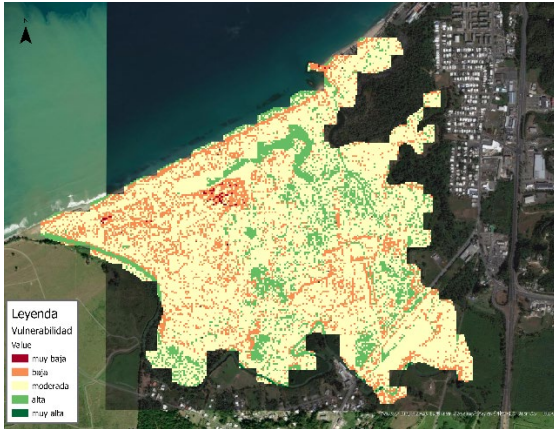


Figura 5
Vulnerabilidad de Inundación



Figura 6
Área de Terreno Modificada para Desarrollo Urbano

Estos cambios implican cambios en dos capas; la capa del modelo de elevación (DEM) y la de usos del suelo. En la capa de usos de suelo se cambió la clasificación del uso del suelo del área que se está modificando por suelo Urbano. La modificación de la capa DEM fue un poco más compleja ya que se convirtió el raster DEM a polígono donde luego se cambiaron los datos de las celdas que se encontraban en el área que se decidió modificar para que su nueva elevación fuera de 1 m, luego de cambiar todas las celdas necesarias se pasó nuevamente la capa a que fuera un raster.

Al tener ya las capas debidamente modificadas se procedió a analizar las mismas con los cambios y volver a realizar la tabla de clasificación y pesos para el nuevo escenario y luego reclasificar las capas y

finalmente ejecutar el modelo con las variables modificadas (Tabla 2).

Tabla 2
Clasificación y Peso de las Variables, Desarrollo Urbano

flood criterio	unit	class	susceptibilidad range	class rating	weight (%)
TWI	level	3.24 - 5.99	very low	1	17
		6.00 - 7.99	low	2	
		8.00 - 9.99	moderate	3	
		10.00 - 12.99	high	4	
		13.99 - 17.3	very high	5	
elevation	m	<-1	very high	5	22
		(-)-1 - 1	high	4	
		1.01 - 3	moderate	3	
		3.01 - 4	low	2	
		4.01 - 7	very low	1	
slope	%	0 - 1.43	very high	5	17
		1.431 - 4.448	high	4	
		4.449 - 8.102	moderate	3	
		8.103 - 11.84	low	2	
		11.85 - 20.25	very low	1	
precipitation	In/year	17.4 - 17.6	very low	1	22
		17.7 - 17.8	low	2	
		17.9 - 18	moderate	3	
		18.1 - 18.2	high	4	
		18.25 - 18.3	very high	5	
uso del suelo	level	SREP-A	very low	1	22
		SREP	low	2	
		VIAL	moderate	3	
		SU	high	4	
		AGUA	very high	5	

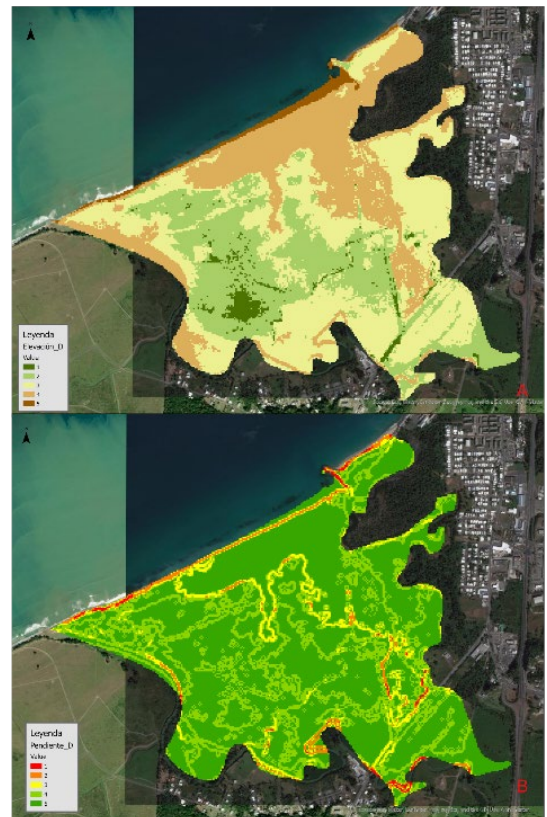


Figura 7
Reclasificación: A) Elevación B) Pendiente

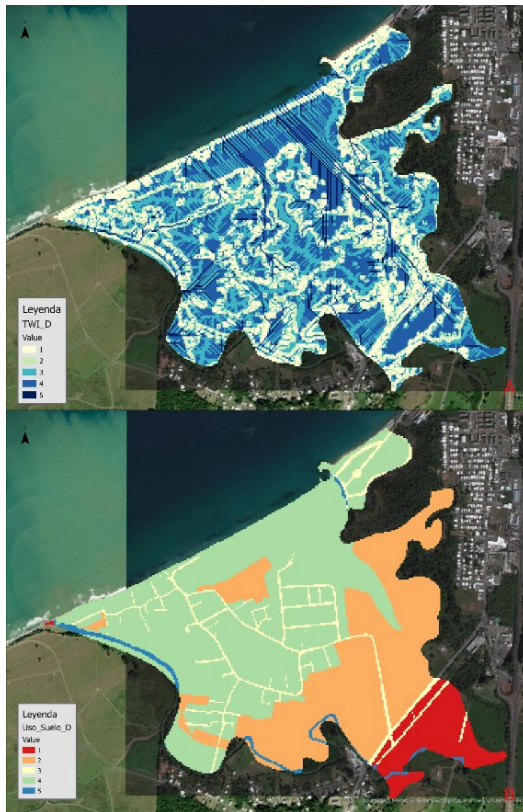


Figura 8

Reclasificación: A) TWI B) Uso de Suelo C) Precipitación

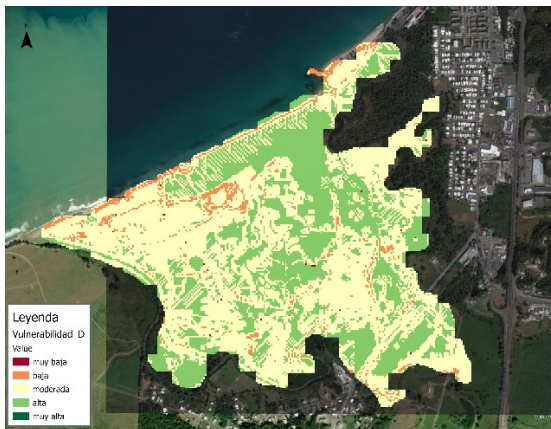


Figura 9

Vulnerabilidad de Inundación, Desarrollo Urbano

Para concluir se realizó un modelo de inundación costera utilizando la herramienta raster calculator para determinar qué áreas se verán inundadas con aumentos o acumulación de agua de 2 m y 3 m. se realizaron para el terreno actual y para el terreno luego del desarrollo urbano para ver cuál sería el cambio en las áreas inundadas debido al cambio en el terreno.



Figura 10
Inundación Costera 2m

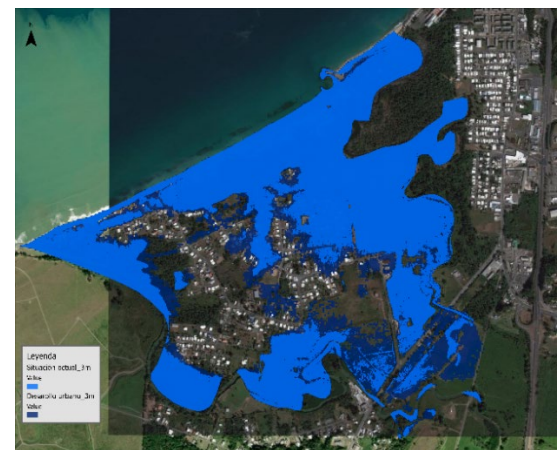


Figura 11
Inundación Costera 3m

RESULTADOS

Al analizar los resultados que se obtuvieron en los mapas creados sobre la vulnerabilidad a inundación del área en el terreno actual y luego de un desarrollo (Figura 5 y 9) se pueden notar a simple vista algunos cambios. En las imágenes se observa como luego del desarrollo urbano la vulnerabilidad en su gran mayoría se encuentra en el rango de moderado y alta, mientras que en el terreno actual se encuentra entre los rangos de baja, moderada y alta. También se observa que en la vulnerabilidad por desarrollo las divisiones son más marcadas y no tan dispersas como se observan en la vulnerabilidad del terreno actual.

Tabla 3
Área de Terreno por Rango de Vulnerabilidad Actual

Vulnerabilidad	Área (m2)	Área (k2)	%
Muy Baja	3,858.88	0.004	0.2
Baja	341,759.84	0.34	17
Moderada	1,345,130.88	1.35	68
Alta	277,652.64	0.28	14
Muy Alta	3,049.76	0.003	0.2

Tabla 4
Área de Terreno por Rango de Vulnerabilidad Desarrollo Urbano

Vulnerabilidad_D	Área (m2)	Área (k2)	%
Muy Baja	1,742.72	0.004	0.1
Baja	87,820.64	0.1	5
Moderada	1,152,996.00	1.15	60
Alta	692,855.68	0.7	36
Muy Alta	62.24	0	0

Luego de realizar un análisis sobre cuanto área de terreno hay por cada rango de vulnerabilidad para cada situación (Tabla 3 y 4) se observan los cambios de una manera más clara. Como resultado de añadir un nuevo desarrollo urbano se observa que cuando actualmente el 17% del terreno tiene una vulnerabilidad Baja y un 14% una vulnerabilidad alta. Hay un cambio considerable contando ahora con un 5% de vulnerabilidad baja y un 36% de vulnerabilidad alta, gran parte de este cambio se observa en el área donde se llevó a cabo el nuevo desarrollo urbano. En cuanto al rango de vulnerabilidad moderada no se observa un cambio muy significativo se observa que luego del desarrollo urbano su porcentaje disminuye un poco debido a que parte de ese terreno subió su vulnerabilidad a alta.

En el área de estudio se encuentran aproximadamente 610 estructuras las cuales consisten en casas, comercios, escuelas y parques. Luego de que se realizó el modelo del pronóstico de zonas inundadas con un aumento del agua de 2 metros y 3 metros para el terreno actual y con el desarrollo urbano se observó claramente que con un nuevo desarrollo se inundarían más área de terreno lo que afectaría más de lo normal a la comunidad del barrio Espinar. En los mapas producidos (ver figuras 10 y 11) se puede observar las áreas que se observan en un azul oscuro son las áreas adicionales que se inundarían luego de un nuevo desarrollo urbano en

adición a las áreas que ya se inundan con el terreno actual.

Tabla 5
Área de Terreno Inundada

Situación	Área inundada (m2)	Área inundada (k2)	%
Actual_2m	720,569.25	0.72	32
Actual_3m	1,229,339.50	1.22	54
Desarrollo_2m	895,820.32	0.9	40
Desarrollo_3m	1,464,196.00	1.46	65

Como se puede observar (tabla 5) para ambas situaciones luego del desarrollo urbano el área de inundación aumenta aproximadamente entre 8-9% comparado al área de inundación con el terreno actual. Al realizar el desarrollo urbano por el cual afecta mediante un aumento en ambos casos de la vulnerabilidad de inundación junto con las áreas que se verían afectadas debido a inundación, se vería afectada la población del barrio debido a que se verían afectadas más estructuras y aumentaría el peligro a la hora de evacuación del área. Durante una situación de inundación con el nuevo desarrollo se inundarían o se verían afectadas 158 estructuras con un aumento de 2m y 371 con un aumento de 3m. Todo esto sin contar las nuevas estructuras que se construyan en dicho desarrollo.

CONCLUSIÓN

Mediante esta investigación se pudo llegar a la conclusión de que el añadir nuevos desarrollos urbanos en distintos entornos geográficos la vulnerabilidad de inundación en la misma se puede afectar significativamente. Es importante tomar en consideración que en esta investigación solo se consideró para evaluar los cambios en elevación del área luego del desarrollo urbano, pero el desarrollo puede implicar nuevos cambios en la impermeabilidad de la superficie, obstáculos por las nuevas estructuras entre otras. En este caso el barrio Espinar es uno que normalmente se ve afectado cuando ocurren desastres naturales debido a su ubicación costera y los dos cuerpos de agua que lo rodean. Luego de la investigación se pudo observar cómo al añadir un desarrollo urbano en un área de terreno el cual actualmente no tiene nada la situación en caso de inundación empeoraría. Se observó como

la vulnerabilidad de inundación aumento debido a que más áreas de terreno pasarían a tener una vulnerabilidad moderada y alta cuando actualmente la gran mayoría se encuentra en una vulnerabilidad baja y moderada. Como se puede observar (tabla 3 y 4) actualmente solo 1.63 kilómetros cuadrados de superficie tienen una vulnerabilidad de moderada a alta y luego del desarrollo aumenta a 1.85 kilómetros cuadrados con vulnerabilidad de moderada a alta.

También se observaron cambios en que áreas de terreno se verían inundadas con el aumento del agua por lluvia o por aumento en el nivel del mar. Luego del desarrollo urbano se vería afectado un mayor porcentaje del terreno del que se afecta actualmente. Como se observa (tabla 5) en ambos casos con un aumento de 2 metros o tres metros luego del desarrollo se vería un aumento de entre 8-9 % de área inundada comparado con la cantidad de área que se inunda actualmente. Lo que en consecuencia afecta aún más a la comunidad ya que se verían afectadas más estructuras y carreteras y por consecuente más familias. Por lo tanto, luego de realizar esta investigación se puede concluir que sería una buena opción verificar como un nuevo desarrollo afectaría la vulnerabilidad del área donde se llevara a cabo antes de construir para verificar si es una buena opción o no.

REFERENCIAS

- [1] P. N. Duy, L. Chapman, M. Tight, P. N. Linh, and L. V. Thuong, "Increasing vulnerability to floods in new development areas: evidence from Ho Chi Minh City," in *Int J Clim Chang Strateg Manag*, vol. 10, no. 1, pp. 197–212, Jan. 2018. Doi: 10.1108/IJCCSM-12-2016-0169.
- [2] K. Loumi and A. Redjem, "Integration of GIS and Hierarchical Multi-Criteria Analysis for Mapping Flood Vulnerability the Case Study of M'sila, Algeria," in *Engineering, Technology & Applied Science Research (ETASR)*, 2021. [Online]. Available: www.etasr.com.
- [3] Konrad C, "Effects of urban development on floods," in *U.S. Geological Survey*, USGS Fact Sheet FS-076-03, November 2003. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/246027695>.
- [4] B. Feng, Y. Zhang, and R. Bourke, "Urbanization impacts on flood risks based on urban growth data and coupled flood models," in *Natural Hazards*, vol. 106, no. 1, pp. 613–627, Mar. 2021. Doi: 10.1007/s11069-020-04480-0.
- [5] P. E. Zope, T. I. Eldho, and V. Jothiprakash, "Impacts of urbanization on the flooding of a coastal urban catchment: a case study of Mumbai City, India," in *Natural Hazards*, vol. 75, no. 1, pp. 887–908, Jan. 2015. Doi: 10.1007/s11069-014-1356-4.
- [6] N. Gaurav and G. Singh, "Delineation of Groundwater, Drought and Flood Potential Zone Using Weighted Index Overlay Analysis and GIS for District Patna, Bihar, India," in *Nature Environment and Pollution Technology*, vol. 21, no. 2, pp. 813–828, Jun. 2022. Doi: 10.46488/NEPT.2022.V21I02.046.
- [7] A. Alsukker, M. Al-Saleem, and M. Etier, "Flood Risk Map Using a Multi-Criteria Evaluation and Geographic Information System: Wadi Al-Mafraq Zone," in *Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering*, vol. 16, no. 2, pp. 291-300, March 2022.