



Sociedad Colombiana
de Ingenieros



Sociedad Tolimense
de Ingenieros



XXIII SEMINARIO NACIONAL DE HIDRÁULICA E HIDROLOGÍA IBAGUÉ, 15 AL 17 DE AGOSTO DE 2018

EL RIESGO ESCONDIDO DE LOS MAPAS DE INUNDACIÓN: EL CASO DE CALI, COLOMBIA

Camilo Cañón¹, Janos Bogardi², Bernhard Tischbein²

¹ Pontificia Universidad Javeriana Cali, Colombia ccanon@javerianacali.edu.co

² Zentrum für Entwicklungsforschung, Alemania jbogardi@uni-bonn.de uls203@uni-bonn.de

RESUMEN

Los mapas de inundación muestran la extensión de un cuerpo de agua luego de un evento de lluvia, bajo ciertos escenarios de clima, uso del suelo, y/o fallas de infraestructura. Sin embargo, la lluvia también causa inundaciones menores en otros lugares y tiempos.

Dichas inundaciones menores ocurren de forma crónica en los barrios, sin proximidad evidente a sus causas, y ocasionan desastres que aún no han sido estimados claramente. En su conjunto, estos desastres menores refrenan el desarrollo de una ciudad, al afectar continuamente el bienestar de la comunidad.

Este estudio caracteriza eventos de lluvia en Cali entre 2000 y 2017, registrados en pasos de 10 minutos, y los correlaciona con desastres reportados por fecha y barrio.

ABSTRACT

Flood maps display the area inundated by a water body after a rainfall event, under scenarios of climate, land use, and/or infrastructure failure. However, rainfall also causes minor floods outside the map's highlighted area.

These minor floods occur often in neighborhoods, with non-evident proximity to a set of causes, causing disasters that have not yet been clearly estimated. Altogether, minor flood disasters curb the development of a city, by continuously affecting the wellbeing of the community.

Mayor Información

Comisión Técnica Permanente
de Ingeniería de Recursos Hídricos

57 (1) 5550520 logistica@sci.org.co

This study characterizes rainfall events in Cali between 2000 and 2017, recorded in 10-min time steps, and correlates them with reported disasters, identified by date and neighborhood.

PALABRAS CLAVE: inundaciones urbanas; caracterización de lluvias; alerta temprana

INTRODUCCIÓN

Las inundaciones menores son desencadenadas por la lluvia. Su profundidad no es mayor que la de un andén, y su extensión es contenible dentro de un barrio; duran aproximadamente un día, y no causan víctimas directas. La anterior definición se basa parcialmente en aquellas de *desastre local* (Cardona, Carreño 2011), *pequeños desastres* (Alcaldía de Santiago de Cali 2014), y *riesgos extensivos* (UNISDR 2015).

A diferencia de las planicies de inundación, conformadas por una superficie uniforme adyacente a un cuerpo de agua, las inundaciones menores pueden ocurrir en cualquier parte de la ciudad, en cualquier momento del año, separadas físicamente, sin proximidad evidente a sus causas, y con consecuencias difíciles de trazar (Figura 1). Los desastres menores por inundación pueden frenar el desarrollo de una ciudad al afectar continuamente el bienestar de sus habitantes.

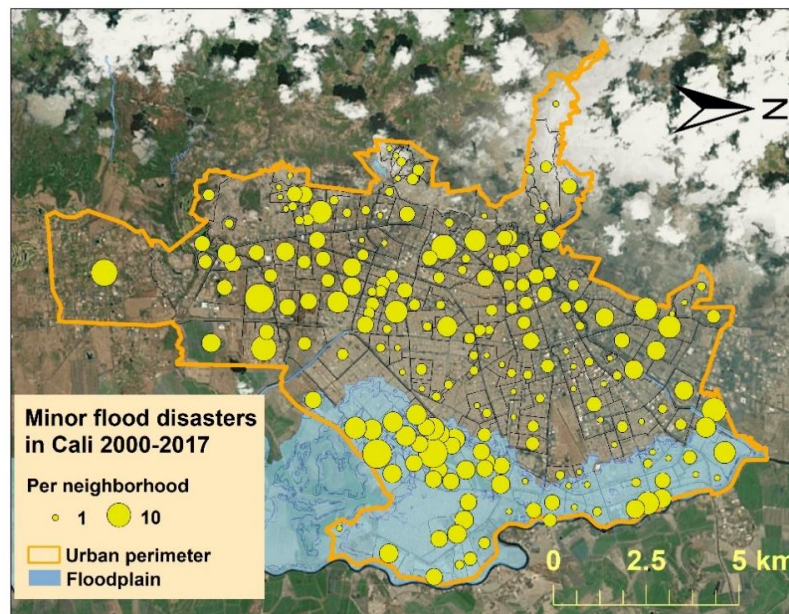


Figura 1.- Conteo de desastres menores por inundación reportados por barrio en Cali entre 2000 y 2017 (probabilidad de excedencia de la planicie de inundación $p=0.002$)

Las inundaciones menores pueden ser una consecuencia de urbanización mal planeada, ciertas configuraciones topográficas e hidrogeológicas, el régimen climático, prácticas

Mayor Información



culturales insensibles, infraestructura de drenaje insuficiente o mal diseñada, degradación ambiental local o regional, entre otras.

Diagnosticar las causas de cada desastre menor reportado en la ciudad es una tarea complicada, sobre todo cuando no se cuenta con detalles relevantes de los hechos. Sin embargo, algunas causas generales pueden derivarse cuando todos los reportes se juntan y se correlacionan con parámetros de lluvia y con atributos de los barrios.

Los hallazgos de este estudio pueden mejorar la forma de recolectar datos relacionados con desastres, así como ofrecer herramientas para calibrar sistemas de alerta temprana en Cali.

Debido a restricciones presupuestales, el gobierno de la ciudad no puede hacer un mantenimiento general permanente para prevenir los desastres menores por inundación (asumiendo que la infraestructura es la causa principal), de modo que este estudio también prioriza algunos puntos críticos de la ciudad para atender primero.

DATOS DE ENTRADA

Para el análisis de correlación fue necesario recoger datos secundarios de eventos de lluvia, atributos de barrio, y reportes de desastres menores por inundación para el área metropolitana de Cali. El período analizado va de 2000 a 2017.

Precipitación

La Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC) maneja 22 estaciones dentro del área tributaria que drena hacia la ciudad de Cali (

Tabla 1). Estas estaciones recogen información de lluvia cada diez minutos, con un colector de cubeta basculante conectado a un transmisor satelital.

Atributos de barrios

Cali está dividida en 336 barrios, agrupados en 22 comunas. Para cada barrio se obtiene información demográfica y atributos físicos:

- Población por barrio proyectada para 2017 con base en el censo DANE de 2005.
- Datos de terreno, que surgen de combinar el levantamiento topográfico del área urbana de Cali con curvas de nivel cada metro (Alcaldía de Cali), datos de elevación de 66,962 tapas de alcantarilla de la red de drenaje de EMCALI, y un modelo de elevación ráster del distrito de Cali, de 15m de resolución, suministrado por la Infraestructura de Datos Espaciales de Santiago de Cali (IDESC)

Mayor Información

- Límites oficiales de las subcuencas y de los barrios dentro del distrito de Cali, suministrados en formato *shape* por el Departamento Administrativo de Planeación Municipal (DAPM).
- Estrato: clasificado de 1 (más bajo) a 6 (más alto), el estrato se calcula por cuadra y se promedia por barrio (Departamento Administrativo de Planeación 2016).
- Mapa de acuíferos: proyección de áreas de descarga, recarga, y sellamiento sobre la ciudad.

Reportes de desastres menores por inundación

El Sistema de inventario de efectos de desastres (DESINVENTAR) recoge información sobre impactos de desastres de escala pequeña, mediana y grande en Latinoamérica, reportados por diarios, grupos de ciudadanos, e instituciones como la policía y el departamento de bomberos.

Se compilaron únicamente desastres asociados con inundaciones causadas por lluvias fuertes, de la base de datos nacional (Colombia), regional (Valle del Cauca) o local (Cali). DESINVENTAR cubre reportes de 2000 a 2015; información de 2016 y 2017 fue añadida consultando periódicos en línea.

La unidad de medición de desastres es el barrio. La mayoría de los reportes detallan los barrios afectados. Algunos incluso especifican las calles o cuadras. Sin embargo, otros reportes solo generalizan zonas como Sureste o Norte de Cali, requiriendo investigación adicional para determinar qué barrios se afectaron exactamente: de no ser claro, se incluyen todos los barrios del área mencionada.

Tabla 1.- Características relevantes de las 22 estaciones de precipitación: tipo OC es climatológica ordinaria y PG pluviográfica. Las áreas aferentes de cada estación son calculadas por polígonos de Voronoi en ArcGis.

Año Inicio	Estación	Tipo	Sub-cuenca	Área aferente [km ²]	Posición de las 22 estaciones en las cuencas de los ríos Aguacatal, Cali, Lili, Meléndez, Cañaveralejo y Pance
2000	El Topacio	OC	Pance	27.1	
	La Teresita	OC	Felidia	18.2	
	Planta Río Cali	PG	Lower Lili	5.1	
	Cañaveralejo	PG	Cañaveralejo	11.6	
	Aguacatal	PG	Aguacatal	32.7	
	Edificio CVC	OC	Lower Lili	12.4	
	Peñas Blancas	PG	Pichindé	30.8	
	Planta Río Cauca	PG	Lower Lili	25.7	
	San Bosco	PG	Lower Lili	10.5	
	San Luis	PG	Lower Cali	17.0	

Mayor Información

2010	Pance-Chorrera	PG	Pance	39.1
	Lili-San Sebastián	PG	Lili	36.0
	Cali Bocatoma	PG	Medium Cali	16.0
2013	Meléndez	OC	Cañaveralejo	7.5
	Pichindé	PG	Pichindé	26.5
2014	Felidia	PG	Felidia	30.3
2015	El Colegio	PG	Aguacatal	15.2
	PTAR	OC	Lower Lili	11.7
	Cañaveralejo	PG	Aguacatal	1.7
	El Ancla	PG	Lower Cali	26.6
	El Cortijo	PG	Lower Lili	74.7
	Meléndez	PG	Lower Lili	39.2
	PTAR Nápoles			

METODOLOGÍA

Los datos de entrada de eventos de lluvia, atributos de barrios y desastres reportados deben ordenarse cronológicamente para análisis estadístico y correlación.

Delimitación de eventos de lluvia

Se define un evento de lluvia como cualquier período o períodos en que se detecta lluvia, separados de otros por varios períodos sin lluvia. Es un reto determinar exactamente cuándo termina un evento y cuándo comienza el siguiente, y qué tan largo debe ser el período intermedio sin lluvias. Los siguientes pasos se llevan a cabo usando el software R:

- Las lecturas de lluvia se parten cada vez que hay un período de 24 horas con valores de lluvia de cero. Este período es completamente arbitrario, y se escogió por la resolución diaria con que se reportan desastres en DESINVENTAR. La literatura no sugiere brechas para separar los eventos.
- Eventos con lluvia total de menos de 1 mm son descartados (32 eventos). Luego de este paso, más de 290,000 lecturas se agrupan en 744 eventos de lluvia, tan cortos como diez minutos y tan largos como 58 días.

Parámetros de Lluvia indicadores de desastres

En Colombia surge la necesidad de usar métodos estadísticos para determinar la relación de parámetros de lluvia y desastres en zonas urbanas, en vez de seguir únicamente umbrales de lluvia empíricos basados en criterio experto (Ramos-Cañón et al. 2016).

Mayor Información

Los siguientes parámetros, algunos existentes en la literatura, se emplean para describir eventos de lluvia:

- Lluvia total [mm]: es el parámetro más versátil, ya que puede calcularse para resoluciones más gruesas (días, meses) sin perder mucha precisión.
- Intensidad máxima [mm/min]: es la lectura más alta de cada evento. Modelos de Lluvia-escorrentía y de contaminantes basados en intensidad de lluvia pueden tener mejor desempeño que basados en caudal, y estar menos afectados por resoluciones más gruesas (Manz et al. 2013).
- Posición pico: es la posición de la mayor lectura dentro del evento. En caso de dos o más períodos compartiendo el máximo valor, se escoge la posición del primero.
- Día de inicio: día del año en que comienza el evento, siendo el 1 de enero el día 1 y el 31 de diciembre el día 365 ó 366 (bisiesto).
- Hora pico: hora entera del día en que la intensidad máxima ocurre. Al igual que con posición pico, en caso de dos o más datos iguales se toma el primero. Las horas van entre 0 y 23
- Duración [min]: es la duración total del evento.
- Períodos de lluvia: este parámetro mide la cantidad de períodos con valores diferentes a cero durante el evento. Provee una medida de la Lluvia efectiva.
- Forma triangular: Es la razón entre la Lluvia total, y el área de un triángulo cuya base es la duración del evento, y la altura la intensidad máxima. Una Lluvia perfectamente homogénea tiene un valor de 2; hietogramas altamente triangulares tienen valores cercanos a 1, mientras que valores cercanos a cero representan cambios abruptos en intensidad (Sofia, Tarolli 2017).
- Asimetría: es la razón entre la cantidad de Lluvia caída antes y después del momento de máxima intensidad; valores cercanos a 1 implican simetría (Sofia, Tarolli 2017).
- Expansión: es la cantidad de estaciones pluviográficas que detectan un evento. Pueden encontrarse eventos detectados por una sola estación, así como por las 22.

Atributos demográficos y físicos de barrio

Se asume que no hay cambios en los atributos de barrio dentro del período 2000-2017, teniendo así un único valor por atributo y por barrio. Los atributos escogidos son:

- Área [km²]: El archivo *shape* de barrios se proyecta sobre el sistema coordinado *MAGNA_Cali_Valle_del_Cauca_2009* y sus áreas se calculan (*Field Calculator* de ArcMap).

Mayor Información



- Densidad de población [hab/Ha]: se calcula como la razón entre la población del barrio y su área.
- Elevación media [m.s.n.m.]: se promedia el valor del ráster de elevación de 5 m de resolución, basado en curvas de nivel de 1m, dentro de cada barrio (*Zonal statistics* de ArcMap).
- Distancia al río [m]: medida desde el centroide de cada barrio hasta el río más cercano (*Near* de ArcMap). Se incluyen todos los ríos que cruzan Cali (Aguacatal, Cali, Cañaveralejo, Lili, Meléndez, Pance, y Cauca), incluso cuando se canalizan y se vuelven parte del sistema de drenaje.
- Pendiente media [grados]: el archivo de elevación ráster se convierte en un archivo de pendientes (*Slope* de ArcMap). El rango de pendientes en Cali va desde 0.0 hasta 71.06 grados. Se encuentra el valor promedio de pendiente por barrio (*Zonal statistics* de ArcMap).
- Rango de pendientes [grados]: valor máximo menos valor mínimo de pendiente en cada barrio. Indica la heterogeneidad topográfica.
- Áreas de acuífero: se asigna un valor de +1 para recarga, -1 para descarga, y cero para sellamiento. Se estima el valor promedio por barrio (*Zonal statistics* de ArcMap).

Pruebas estadísticas para parámetros de lluvia

Se determinan los eventos de lluvia relacionados con reportes de desastres: el criterio es que cualquier desastre reportado el mismo día que comienza un evento de lluvia y hasta dos días después que el evento termina (un día para la materialización del desastre y otro para publicar el reporte), es consecuencia directa de ese evento.

Diferencias en los parámetros de lluvia cuando hay desastres y cuando no

De los 744 eventos de Lluvia detectados, 105 fueron asociados con desastres. Se separan los eventos en dos muestras, los asociados con desastres (105) y los que no (639), y se hace su estadística descriptiva usando la función *fivenum* de R (Tabla 2). Las pruebas estadísticas muestran diferencias significativas y determinan rangos de valores útiles para calibrar eventualmente un sistema de alerta temprana (Tabla 3).

La prueba T compara cada parámetro en ambas muestras y halla la diferencia en sus valores medios, junto con su intervalo de confianza (nivel de significancia de 0.05). Siempre que la heteroscedasticidad sea significativa con respecto a una prueba F, y la prueba T también lo sea, se lleva a cabo una prueba Wilcox (W) para verificar los resultados iniciales. La prueba W es más robusta en casos de heteroscedasticidad y distribuciones no-normales.

Mayor Información

Tabla 2.- Estadística descriptiva de los parámetros de lluvia, para eventos relacionados y no con desastres

Rainfall parameter	min		1st quartile		Median		Mean		3rd quartile		Max	
	Disaster	Non	Disaster	Non	Disaster	Non	Disaster	Non	Disaster	Non	Disaster	Non
Total rainfall [mm]	7.3	1	55.5	13	118.7	36.77	310.1	103.6	196.1	73.5	1173	393.8
Max. intensity [mm/min]	0.33	0.02	0.92	0.43	1.6	0.99	2.04	1.69	2.37	1.56	5	5.45
Peak Position [-]	1	1	10	3	61	6	1573	1131	453	32	7340	5611
Begin Year day [day]	5	2	96	89	126	168	171	178	272	265	356	365
Peak hour [h]	0	0	5	5	10	13	10.8	11.8	16	18	23	23
Duration [min]	55	20	290.2	110.1	2462	310.2	19090	5447	8736	1651	8390	25150
Rain periods [-]	4	2	29	9	98	19	1141	527	549	63	5025	2543
Triangular shape [-]	0.0049	0.004	0.0159	0.0503	0.0615	0.2582	0.3351	0.608	0.3367	0.7274	1.257	2
Asymmetry [-]	0.0002	0.0002	0.0021	0.0115	0.0072	0.0341	0.1968	10.37	0.02067	0.1319	0.9536	51.67
Spots [-]	1.5	1	1.8	1.8	4.4	2.9	8.4	6.5	12.4	5.9	22	21

La prueba W no calcula la diferencia entre medias de las muestras, solo confirma si la hay o no, pero en este estudio se obtiene cambiando el valor de cero en la hipótesis nula por cierto valor μ . Cuando dicho valor μ haga no significativa la prueba W, entonces se asume como la diferencia de medias entre los parámetros. Las pruebas T y F se hacen en Stata y la prueba W en R

Tabla 3.- Diferencias estadísticas entre eventos relacionados y no con desastres

Rainfall parameter	F-test	t-test	diff(mean)	CI 0.95	Units	W-test	μ
Total rainfall	p<0.001 *	p<0.001 *	-98.8	(-130.8_-66.9)	mm	p<0.001 *	-53.4
Maximum intensity	p=0.01 *	p<0.001 *	-0.65	(-0.86_-0.44)	mm/min	p<0.001 *	-0.42
Peak Position	p<0.001 *	p<0.001 *	-512	(-764_-260)	[-]	p<0.001 *	-55
Begin Year day	p=0.705	p=0.459			day	[-]	
Peak hour	p=0.398	p=0.077			h	[-]	
Duration	p<0.001 *	p<0.001 *	-6368	(-9059_-3676)	min	p<0.001 *	-2652
Rain periods	p<0.001 *	p<0.001 *	-396	(-572_-221)	10 min	p<0.001 *	-88
Triangular shape	p<0.001 *	p<0.001 *	0.22	(0.15_0.28)	[-]	p<0.001 *	0.05
Asymmetry	p<0.001 *	p<0.001 *	0.42	(0.19_0.65)	[-]	p<0.001 *	0.012
Spots	p<0.001 *	p<0.001 *	-2.5	(-3.6_-1.4)	[-]	p<0.001 *	-1.8

* significant result (<0.05)

Parámetros de lluvia como predictores de desastres menores por inundación

¿Qué tan bien predicen los parámetros de lluvia, juntos o por separado, si un desastre menor ocurrirá? La variable binaria ‘Desastre’ vale 1 para evento de lluvia relacionado con desastre y cero para no relacionado.

La regresión logística predice la variable ‘Desastre’ ya que es categórica. La opción *Robust* de Stata corrige valores *p* por efecto de distribuciones no-normales. Con excepción de *Día de inicio*, *hora pico*, y *asimetría*, todos los parámetros resultaron significativos por

Mayor Información



Sociedad Colombiana
de Ingenieros



Sociedad Tolimense
de Ingenieros

**XXIII Seminario
Nacional
DE HIDRÁULICA E HIDROLOGÍA**

separado. La función *stepwise* determina si algunas variables independientes pueden removerse sin disminuir la capacidad predictiva del modelo conjunto. La Tabla 4 muestra la regresión logística con los parámetros no removidos por *stepwise*.

Parámetros de lluvia como predictores del número de barrios afectados por desastres menores

La variable ‘Ourrencias’ cuenta cuántos barrios fueron reportados afectados en cada desastre menor. Una regresión de Poisson es idónea para predecir esta variable contable. Cada parámetro de lluvia se usa por separado como predictor (*día de inicio, hora pico, forma triangular y asimetría* son no significativos), y luego conjuntamente (Tabla 5).

Mayor Información

Comisión Técnica Permanente
de Ingeniería de Recursos Hídricos

57 (1) 5550520 logistica@sci.org.co

Con la regresión de Poisson se correlaciona ‘Eventos’ con los atributos de los 336 barrios en la ciudad. La única variable categórica dentro de los atributos de barrio es el nivel socioeconómico o estrato (SEL), y sus categorías se comparan entre sí, usando el estrato 1 como referencia (Tabla 6).

La Razón de Tasas de Incidencia (IRR en inglés) muestra el porcentaje de cambio de la variable dependiente por cada unidad que cambia la variable independiente. *Distancia al río* (toriver) se expresa en cientos de metros; *pendiente media* (meanslope) y *rango de pendientes* (rangeslope) en decenas de grados, y *densidad de población* (dens) en cientos de habitantes por hectárea.

Tabla 6.- Regresión de Poisson conjunta con atributos de barrio para predecir la variable ‘Eventos’

```
Poisson regression                               Number of obs   =       336
                                                Wald chi2(11)   =       90.17
                                                Prob > chi2     =       0.0000
Log pseudolikelihood = -866.49036              Pseudo R2      =       0.0963
```

events	Robust		z	P> z	[95% Conf. Interval]	
	IRR	Std. Err.				
sel						
2	.8296452	.1135522	-1.36	0.172	.6344389	1.084913
3	.7522523	.1187369	-1.80	0.071	.552088	1.024988
4	1.379104	.3060244	1.45	0.147	.8927191	2.13049
5	1.222129	.2483971	0.99	0.324	.8205607	1.820217
6	1.217387	.340801	0.70	0.482	.703298	2.10726
mas1	.9988556	.0029075	-0.39	0.694	.9931733	1.00457
toriver100	.9677408	.008053	-3.94	0.000	.9520852	.9836539
meanslope10	.5603602	.1970879	-1.65	0.100	.2812456	1.116475
rangeslope10	1.144452	.0771442	2.00	0.045	1.002815	1.306095
dens100	1.135535	.0386772	3.73	0.000	1.062204	1.213928
dacquirer	1.008243	.0694758	0.12	0.905	.8808678	1.154036
_cons	9.30328	26.21148	0.79	0.429	.0371897	2327.284

Márgenes predictivos de desastres menores por inundación con atributos de barrio

Los márgenes predictivos son una forma más gráfica y entendible de ver las interacciones de las variables independientes con la dependiente. La variable independiente de interés puede analizarse mientras las demás permanecen con valores fijos. La Figura 2 muestra los efectos de los atributos de barrio estadísticamente significativos sobre la variable ‘Evento’ (funciones *margins* y *marginsplot* de Stata).

Interacciones entre estratos y atributos de barrio significativos

Mayor Información

A veces las interacciones entre una variable categórica y una continua pueden mostrar tendencias internas opuestas entre categorías que no se muestran en la regresión general. Se realiza una regresión de Poisson que incluye las interacciones entre estratos (variable categórica) y los atributos significativos (*distancia al río, rango de pendientes, y densidad de población*).

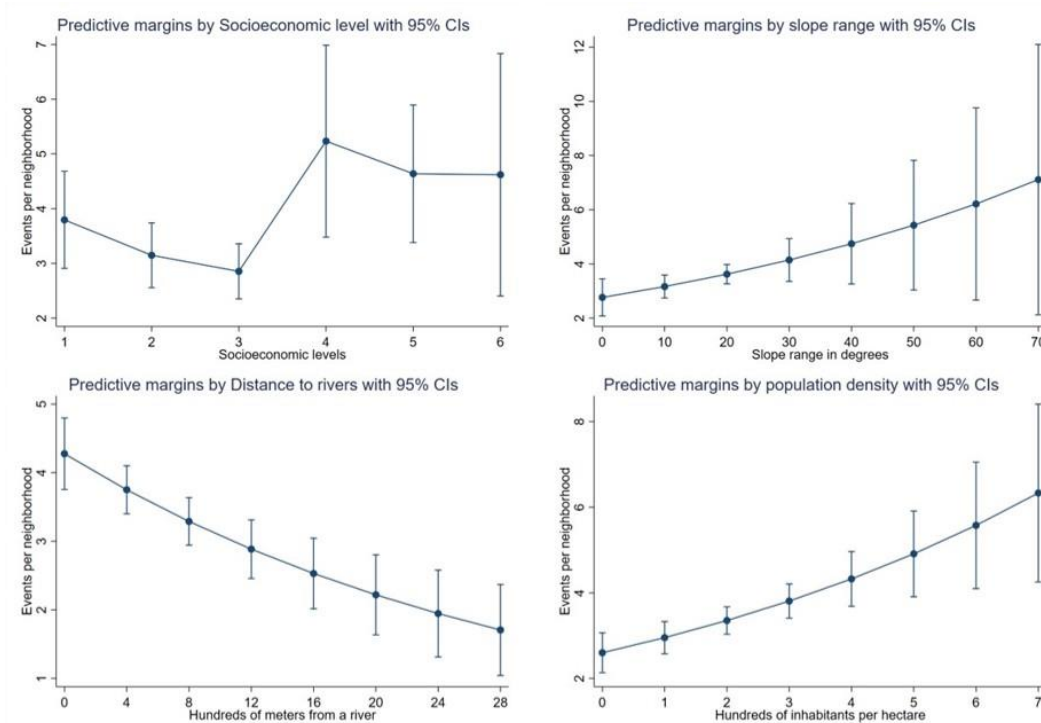


Figura 2.- Márgenes predictivas para la variable 'Eventos' con los atributos de barrio significativos de Poisson

Las interacciones comparan los estratos 2 al 6 con el estrato 1. Mientras que no hay diferencias significativas para interacciones con *distancia al río*, sí las hay para *rango de pendientes* (SEL 1) y densidad de población (SEL 1 y 6). La Figura 3 muestra estas interacciones significativas gráficamente.

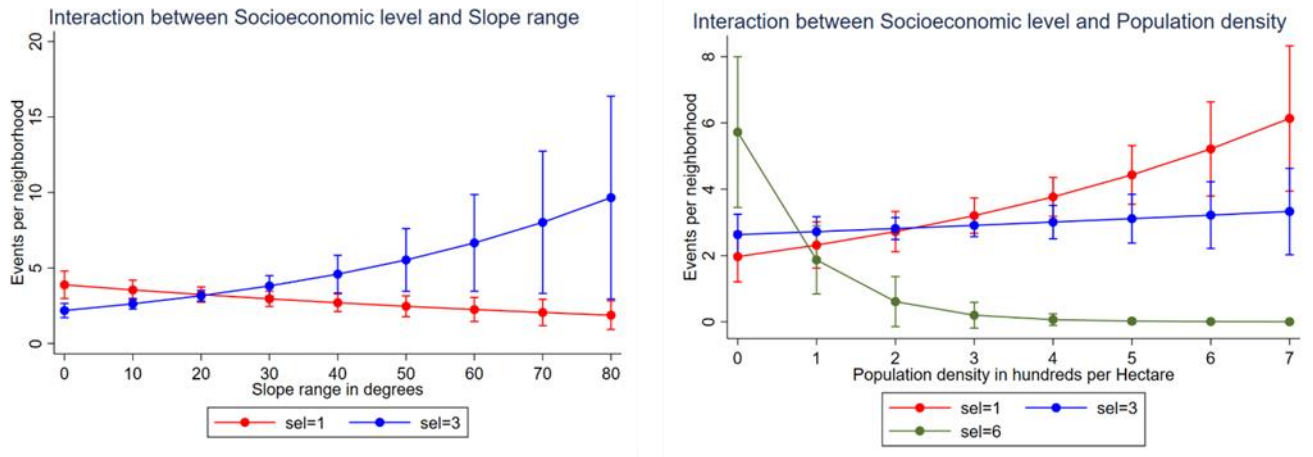


Figura 3.- Efecto de *rango de pendientes* y *densidad poblacional* sobre desastres en barrios de distintos estratos

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Diferencias en los parámetros de lluvia entre eventos relacionados con desastres y eventos que no

Todos los parámetros de lluvia (excepto *Día de inicio* y *Hora pico*) de los eventos relacionados con desastres muestran diferencias estadísticamente significativas de aquellos que no (Tabla 3), sugiriendo que el régimen de lluvia es una de las causas de desastres menores por inundación en Cali.

El signo en la diferencia media significativa entre muestras sugiere que en promedio los eventos de lluvia más voluminosos, intensos, duraderos, continuos, con picos más tempranos, y con mayor expansión espacial, tienen más probabilidad de causar desastres menores por inundación en Cali. Algunas de estas características coinciden con aquellas que el cambio climático puede provocar: lluvias más voluminosas, duraderas, continuas, y con pico más temprano (Sofía, Tarolli 2017).

La Secretaría de Gestión del Riesgo ha declarado que la red de drenaje en Cali puede colapsar con intensidades superiores a los 30 mm/h, o con lluvias totales de más de 40 mm (ADN Cali 2016). No obstante, en este estudio se encontraron 19 eventos de Lluvia por debajo de 40 mm que causaron desastres en la ciudad (incluyendo un evento de 7.3 mm); también hubo cuatro eventos con intensidades por debajo de los 30 mm/h.

Valores tan bajos de Lluvia total e intensidad causando desastres serían producto de errores en las lecturas de las estaciones pluviográficas, o de partes de la ciudad muy vulnerables que colapsan con pocos milímetros de lluvia, o de ambas.

Mayor Información

Parámetros de lluvia como predictores de eventos de lluvia relacionados con desastres

Cada uno de los parámetros de lluvia que predijeron desastres conjuntamente, lo pueden hacer también por separado (excepto *Asimetría*). Los coeficientes de correlación más altos (Pseudo R²) se obtuvieron para *lluvia total* (0.1338) y *duración* (0.1326).

La proporción de probabilidades (*odds ratio*) muestra cómo aumenta la probabilidad de que ocurra un desastre cuando un parámetro de lluvia aumenta en una unidad: por ejemplo, el aumento en una pulgada de *lluvia total* aumentaría la probabilidad de desastres 1.28 veces.

Si la intensidad máxima aumenta 1 mm/min, la chance de tener un desastre aumentará 1.94 veces. El rango de valores de intensidad de los 744 eventos analizados es estrecho (de 0.02 mm/min a 5.45 mm/min), y por esto es un parámetro muy sensible.

La forma triangular muestra que un incremento de una unidad, es decir, un evento más homogéneo, reduciría las chances de un desastre 5.34 veces. Finalmente, cada estación adicional que detecte un evento de lluvia indicaría que la probabilidad de ocasionar un desastre aumenta 1.07 veces.

Las correlaciones obtenidas son aceptables teniendo en cuenta que se trata de datos observados de efectos climatológicos en áreas urbanas. Sin embargo, la correlación podría ser mucho más alta, si se incluyeran más variables, reduciendo así la significancia de la variable 'constante'.

Como los valores definitivos de los parámetros de lluvia pueden saberse solo al final de cada evento (excepto *Día de Inicio*), no serían útiles a primera vista para configurar un sistema de alertas tempranas. No obstante, hay parámetros que solo pueden acumularse en el tiempo (*Lluvia total*, *duración*, y *períodos de lluvia*), para los que pueden definirse umbrales que activen alarmas cuando se superen.

Parámetros de lluvia como predictores del número de barrios afectados por inundaciones menores

La variable 'Ocurrencias' añade información sobre la severidad del impacto de los eventos de lluvia sobre la ciudad al contar el número de barrios afectados. *Lluvia total*, *intensidad máxima*, *posición pico*, *duración*, *períodos de lluvia* y *expansión* explicaron por separado significativamente a 'Ocurrencias'.

Una pulgada adicional de *lluvia total* aumentaría la probabilidad de un barrio adicional afectado 1.11 veces. La *intensidad máxima* vuelve a ser muy sensible, incrementando la chance de un barrio adicional inundado 1.69 veces por cada mm/min más. Cada estación adicional que detecte el evento de precipitación aumentaría la probabilidad de un barrio extra afectado 1.08 veces.

Mayor Información



El valor ‘constante’ no es significativo esta vez, implicando que aparentemente para esta regresión las variables consideradas fueron suficientes para explicar a la dependiente, o que el efecto promedio de las variables no incluidas se cancela.

Atributos de barrio como predictores del número de desastres reportados por barrio

Las variables *distancia al río*, *rango de pendientes*, y *densidad de población* explican significativamente el número de desastres menores por inundación reportados en los barrios de Cali. El coeficiente de correlación de Poisson (Pseudo R² de 0.0963) es tan bajo que tiene que haber variables no incluidas relacionadas con desastres en los barrios.

Los márgenes predictivos muestran el número esperado de desastres por barrio debidos a un atributo en particular (Figura 2). Así puede notarse cómo los barrios de estratos más altos tendrían en promedio más desastres que los de estratos bajos, pero también una variabilidad más alta en estos valores, debida probablemente a variables que no definen el estrato y que no están incluidas, como el estado de la infraestructura de drenaje y la presencia de zonas verdes. Los barrios de estratos bajos no son afectados tan seguido, pero su baja varianza implica que los desastres se expanden más homogéneamente entre éstos.

Los valores altos de *rango de pendientes* llevan a más desastres esperados en los barrios, y también a variabilidades más altas. Los rangos de pendiente altos permiten a las redes de drenaje transportar el agua sin mayor esfuerzo por gravedad. Sin embargo, si no hay mantenimiento o hay mal diseño, entonces las ventajas topográficas naturales se convierten en obstáculos, conduciendo a encharcamientos y crecientes. Esta disparidad en comportamientos hidráulicos podría explicar dicha variabilidad alta para ese atributo. El estrato 1 difiere de la tendencia anterior al disminuir sus desastres a medida que aumentan los contrastes topográficos.

A medida que aumenta la distancia al río, la cantidad esperada de desastres menores por barrio disminuye consistentemente, manteniendo también una variabilidad regular. Éste es quizá el atributo de barrio más influyente sobre los desastres menores por inundación, apuntando a redes de drenaje sub-dimensionadas o alcantarillas ahogadas por las basuras, como la causa que aumenta la vulnerabilidad a los desastres menores cerca de los ríos.

La densidad de población aumenta junto con la cantidad esperada de desastres por barrio. No obstante, el impacto de la densidad de población sobre los desastres menores es mayor en estratos bajos (Figura 3); el estrato 3 tiene un leve incremento, y el estrato 6 ni siquiera tiene barrios con los valores más altos de densidad (a partir de 500 habitantes por hectárea) para contrastarlos. Los aumentos de población en barrios de estrato bajo usualmente ocurren sobre la misma infraestructura inicial que había sido diseñada para menos gente, o para usos no residenciales. Mientras tanto, los aumentos de densidad en estratos más altos son usualmente una consecuencia de proyectos urbanos nuevos que buscan deliberadamente densificar el área, y preparan su infraestructura a priori.

Mayor Información



CONCLUSIONES

La información calibrada de Lluvia debe estar disponible en línea, para reducir tareas administrativas de los empleados de la CVC, así como tiempos de espera para los interesados. Esto es parte de la cooperación entre entidades públicas y privadas para tomar y sintetizar datos para la reducción de desastres (Cutter, Gall 2015; Corfee-Morlot et al. 2011).

Puede que, durante los eventos de lluvia más severos, los organismos de ayuda estén más ocupados para llenar un reporte detallado, resumiendo todo con expresiones como ‘Sur de Cali’, cuando precisamente son estos eventos los que más detalle necesitan; también es muy probable que las comunidades asentadas ilegalmente no reporten desastres en absoluto, para no exponer sus actividades a las autoridades. En consecuencia, estos reportes subestiman los impactos cerca de asentamientos ilegales, y pierden detalle de las tormentas más fuertes. La capacitación de personal para tomar información precisa en los barrios es urgente, así como el apoyo con imágenes satelitales de resolución diaria que permitan revisar todos los lugares en la ciudad (no solo los que reportan) que han sido inundados y así complementar los reportes.

La mayoría de los parámetros de lluvia pueden, por separado, diferenciar eventos de lluvia asociados con desastres de aquellos que no, y algunos siguen siendo significativos en la regresión conjunta. Los parámetros de *lluvia total*, *duración*, y *períodos de lluvia* pueden desatar alarmas cuando se alejen de los valores esperados para eventos no asociados con desastres.

La intensidad máxima está altamente asociada con probabilidades de desastres menores por inundación y con número de barrios afectados. Soluciones de bajo impacto como recolección de agua lluvia a gran escala (lagunas de regulación) o a escala de hogares (tanques de almacenamiento) reducirían hasta un 75 % el pico de caudal al almacenar parte de la lluvia que se convierte en escorrentía (Avila et al. 2016).

Los atributos de barrio correlacionados significativamente con desastres (*densidad de población*, *distancia al río*, y *rango de pendientes*) están asociados con presión urbana sobre riberas de protección, un fenómeno común en países en desarrollo. Las planicies de inundación representan riesgos, pero también beneficios: alta densificación, productividad, y valores más altos de PIB. Las medidas para reordenar el territorio deben ayudar a mitigar inundaciones sin afectar ese mismo territorio durante la sequía (Integrated flood management 2009).

Mayor Información



BIBLIOGRAFÍA

ADN Cali (2016): Preparación para lluvias, preocupa. Cali, 6/22/2016, p. 3.

Alcaldía de Santiago de Cali (2014): *Revisión ordinaria del Plan de Ordenamiento Territorial de Santiago de Cali*. Con ayuda de DAPM, revisado el 9/11/2017.

Avila, Humberto; Avila, Leandro; Sisa, Augusto (2016): "Dispersed Storage as Stormwater Runoff Control in Consolidated Urban Watersheds with Flash Flood Risk". *J. Water Resour. Plann. Manage.* 142 (12), p. 4016056. DOI: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000702.

Cardona, O. D.; Carreño, M. L. (2011): "Updating the Indicators of Disaster Risk and Risk Management for the Americas". *IDRiM Journal* 1 (1), pp. 27–47. DOI: 10.5595/idrim.2011.0014.

Corfee-Morlot, Jan; Cochran, Ian; Hallegatte, Stéphane; Teasdale, Pierre-Jonathan (2011): "Multilevel risk governance and urban adaptation policy". *Climatic Change* 104 (1), pp. 169–197. DOI: 10.1007/s10584-010-9980-9.

Cutter, Susan L.; Gall, Melanie (2015): "Sendai targets at risk". *Nature Climate change* 5, 707 EP -. DOI: 10.1038/nclimate2718.

Departamento Administrativo de Planeación (2016): *Cali en cifras 2015*. Con ayuda de Guido Escobar, revisado el 1/25/2018.

Integrated flood management. Concept paper (2009). Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization; Associated Programme on Flood Management (WMO, no. 1047).

Manz, Bastian Johann; Rodríguez, Juan Pablo; Maksimović, Čedo; McIntyre, Neil (2013): "Impact of rainfall temporal resolution on urban water quality modelling performance and uncertainties". *Water Science & Technology* 68 (1), p. 68. DOI: 10.2166/wst.2013.224.

Ramos-Cañón, Alfonso Mariano; Prada-Sarmiento, Luis Felipe; Trujillo-Vela, Mario Germán; Macías, Juan Pablo; Santos-R, Ana Carolina (2016): "Linear discriminant analysis to describe the relationship between rainfall and landslides in Bogotá, Colombia". *Landslides* 13 (4), pp. 671–681. DOI: 10.1007/s10346-015-0593-2.

Sofia, Giulia; Tarolli, Paolo (2017): "Hydrological Response to ~30 years of Agricultural Surface Water Management". *Land* 6 (1), p. 3. DOI: 10.3390/land6010003.

UCLA (2016): *T-test Stata annotated output*. Institute for Digital Research and Education. Disponible en línea en <https://stats.idre.ucla.edu/stata/output/t-test/>, revisado en noviembre de 2017.

Mayor Información



Sociedad Colombiana
de Ingenieros



Sociedad Tolimense
de Ingenieros

**XXIII Seminario
Nacional
DE HIDRÁULICA E HIDROLOGÍA**

UNISDR (2015): *Making development sustainable. The future of disaster risk management.*
Geneva, Geneva: United Nations (Global assessment report on disaster risk reduction,
4.2015), revisado el 9/11/2017.

Mayor Información

Comisión Técnica Permanente
de Ingeniería de Recursos Hídricos

 57 (1) 5550520  logistica@sci.org.co