

5 IMPLICACIONES DE LOS RESULTADOS EN EL DISEÑO DE OBRAS HIDRÁULICAS.

5.1 Sobre la estimación de curvas IDF de 1 a 24 horas en la región Andina Colombiana.

Uno de los objetivos iniciales de este trabajo era regionalizar los resultados de la estimación de las curvas IDF siguiendo el procedimiento propuesto por la metodología de Escalamiento 2 (Yu et al. 2004). Tal enfoque propone usar un modelo de escalamiento por tramos dependiente de los rangos donde se encontraran variaciones en el exponente de escalamiento, los cuales no se presentan en las estaciones estudiadas de la región Andina de Colombia, ya que todas las estaciones exhiben escalamiento simple. De esta forma queda solamente una ecuación para el conjunto de estaciones analizadas (ecuación 2-25). Esta condición permite simplificar los cálculos y extrapolar los resultados a la región Andina de Colombia entre las latitudes de los datos ($1^{\circ}15'N$ hasta $10^{\circ}25'N$) y para alturas entre 260 y 2595 metros sobre el nivel del mar, con interesantes y atractivas posibilidades prácticas.

A manera de lista de chequeo, a continuación se describe el procedimiento para aplicar las metodologías usadas en el presente estudio, en relación con la estimación de las curvas IDF de 1 a 24 horas en la región Andina de Colombia.

¿Existen datos horarios? Si la respuesta es afirmativa:

Se podrían utilizar la metodología tradicional, con lo que esto implica (facilidad de los cálculos, ajuste de las intensidades a los factores de los datos). Sin embargo, es necesario definir la aversión al riesgo por parte del diseñador. En el caso de ser conservador en el diseño, se debería escoger la metodología tradicional usando la función Gumbel. Si se desea ser un poco más liberal, con la ventaja que las intensidades se ajustan mejor a los datos, se puede usar la metodología tradicional usando la función Log Normal, pero si el diseño exige usar periodos de retorno elevados (esto solo sucede en estructuras especiales, de mucho riesgo o de tamaño considerable), proponemos usar las funciones estables, buscando la seguridad, pues estas funciones se caracterizan porque sus colas pesadas decrecen de manera lenta y por tanto (según la función de densidad) los valores extremos tienen probabilidad significativa, aunque en realidad se puede usar cualquier función de probabilidad y determinar si se necesita un mejor ajuste de los datos o un factor de seguridad elevado.

También se pueden usar las metodologías de escalamiento, que son un poco más sofisticadas, con la posibilidad de que se pueda determinar directamente el exponente de escalamiento a partir de los datos, siguiendo la metodología de PWMs (ecuación 2-10), y posteriormente usar cualquiera de las metodologías de escalamiento descritas en esta investigación. Se podría estimar también la precipitación máxima de 24 horas, lo que

permite usar el valor directamente y sin ninguna corrección (incremento del 11% expresado en el numeral 4.3.1). Cualquiera de las dos metodologías son más seguras en términos del diseño, ya que registran los mayores valores frente a otros métodos de estimación de intensidad para las duraciones más cortas (1 a 2 horas), mientras que para duraciones mayores los valores son menores que los métodos tradicionales con cualquier función de probabilidad, pero esto se compensa por el basamento teórico-analítico de estas metodologías.

En resumen, con los datos horarios se pueden determinar todas las variables que se requieren para aplicar cualquiera de las metodologías de escalamiento, incluso la de funciones estables.

¿Existen datos horarios? Si la respuesta es negativa:

Es lo que usualmente ocurre, ya que las entidades que recogen y almacenan estos registros, normalmente los venden o los ceden con una agregación diaria. Por lo que es conveniente preguntarse que tipos de registros se pueden adquirir.

¿Existen datos de precipitación máxima de 24 horas? Si la respuesta es afirmativa:

Frente la ausencia de datos horarios, no es posible usar la metodología tradicional para estimar todas las curvas IDF, pero es posible realizar ajustes con cualquier función de probabilidad para determinar el valor de la precipitación máxima de 24 horas asociado a cualquier periodo de retorno, y a este valor aplicarle un factor para reducir esta precipitación a cualquier otra duración entre 1 y 24 horas. Cabe anotar que al estimar este valor no es necesario incrementarlo el valor máximo de 24 horas, por lo tanto, si se desea usar los factores descritos en este trabajo, los mismos deberán ser recalculados ya que están afectados por la relación entre la precipitación diaria y la de 24 horas.

Ahora bien, los modelos de escalamiento poseen la facilidad de usar esta información ya que con las hipótesis de invarianza en la escala es posible determinar duraciones menores de 24 horas usando el valor de $-0,829$ para el exponente de escalamiento (ecuaciones 2-19 y 2-25), en la región Andina Colombiana con las restricciones de latitud y altura antes descritas, usando cualquiera de las metodologías propuestas de escalamiento. En el caso de que se desee usar el método de Escalamiento 1, se podría encontrar el promedio de los valores de los datos y estimar los parámetros que son requeridos por la ecuación 2-19 (media, desviación estándar y coeficiente de variación). En el caso de usar el método de Escalamiento 2, el análisis es un poco más laborioso ya que la estimación de los parámetros α y μ , se debe realizar mediante el uso de los PWMs (ecuación 2-10). Sin embargo, esto sólo es un pequeño paso adicional y no constituye un obstáculo insalvable.

¿Existen datos de precipitación máxima de 24 horas? Si la respuesta es negativa:

Sólo podrían existir 2 opciones: que se disponga de información de precipitación máxima diaria, ó que existan estimativos de la intensidad promedio máxima anual. Entonces cabe preguntarse lo siguiente.

¿Existen datos de precipitación máxima diaria? Si la respuesta es afirmativa:

Básicamente se puede seguir el procedimiento antes descrito para la respuesta afirmativa si se tienen datos de precipitación de 24 horas, pero se recomienda realizar el incremento del 11%, debido a la diferencia entre el valor máximo diario y el de 24 horas.

¿Existen datos de precipitación máxima diaria? Si la respuesta es negativa:

Según la metodología descrita, sólo sería posible usar estimativos promedio de precipitación máxima diaria anual, lo cual se refiere a la siguiente pregunta de la lista de chequeo.

¿Existe un estimativo de la precipitación máxima diaria anual? Si la respuesta es afirmativa:

Con sólo esta información no es posible estimar las curvas IDF con la metodología tradicional, ni tampoco es posible usar este dato y estimar las curvas IDF por medio de la metodología de Escalamiento 1, ya que se necesita el estimativo de la desviación estándar. Sin embargo, es posible obtener los valores de los parámetros μ y α de la ecuación 2-25 usando la metodología de Escalamiento 2 mediante una relación encontrada entre el valor promedio máximo en 24 horas anual y el valor de la variable μ como se muestra en la Figura 5-1. El cálculo del parámetro α se realiza por medio de la ecuación obtenida en este trabajo, según la cual

$$\mu_{24} = 0.88 m - 0.04 \quad 5-1$$

$$\alpha_{24} = (\mu_{24} - m) / -0.5772 \quad , \quad 5-2$$

en donde:

μ_{24} : Parámetro para la estimación de las intensidades de lluvia de 24 horas para la estimación de las curvas IDF por el método de Escalamiento 2, según la ecuación 2-25.

α_{24} : Parámetro para la estimación de intensidad de lluvia de 24 horas para la estimación de IDF por el método de Escalamiento 2, según la ecuación 2.25.

m : Intensidad media calculada con el valor de la precipitación promedio máxima anual.

Cabe anotar que las ecuaciones 5-1 y 5-2 no son independientes totalmente del valor promedio de la precipitación máxima diaria, puesto que para la estimación de los parámetros por medio del método de los PWMs, se debe obtener el momento de orden 0 (la media) y relacionarlo con el momento de orden 1 con el fin de evitar variaciones con datos espurios encontrados en la serie. Sin embargo, las ecuaciones antes descritas (5-1 y 5-2) permiten el cálculo fácil de las curvas IDF usando el valor promedio de la precipitación máxima diaria anual y el exponente de escalamiento descrito anteriormente.

Al utilizar las ecuaciones 5-1 y 5-2 y compararlas con los valores obtenidos por el método de Escalamiento 2 usando todos los datos horarios, se obtuvieron diferencias en promedio inferiores al 5% y variaciones máximas entre el 20% y 25%. En última

instancia, ésta metodología es la manera más simple de determinar valores de precipitación para duraciones entre 1 a 24 horas.

A manera de ayuda, en la Tabla 5-1 se presentan los valores de la intensidad promedio máxima anual de 24 horas para todas las estaciones y el valor obtenido de μ_{24} , necesarios para implementar la metodología de Escalamiento 2. En la Figura 5-1 se muestra la relación entre los datos del parámetro μ y la precipitación máxima promedio anual usada para determinar las ecuaciones 5-1 y 5-2, y en la Figura 5-2 se muestran los valores de la precipitación máxima de 24 horas anual en las estaciones respectivas.

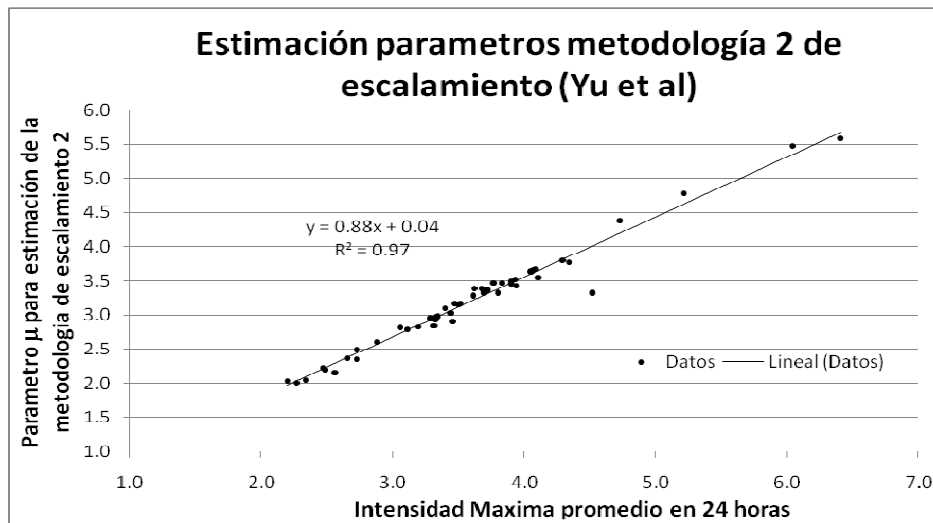


Figura 5-1 Relación entre el parámetro μ de la metodología de Escalamiento 2 y la intensidad máxima en 24 horas promedio anual.

Tabla 5-1 Tabla de precipitación, intensidad y μ_{24} para todas las estaciones analizadas.

Estaciones	Precipitación promedio máxima anual en 24 horas	Intensidad promedio máxima anual en 24 horas	μ_{24}
Agronomía	79.91	3.33	2.98
Aguas Blancas	88.55	3.69	3.33
Alban	56.12	2.34	2.04
Arturo Gómez	73.34	3.06	2.82
Bertha	65.44	2.73	2.50
Bizcocho	125.19	5.22	4.78
Blonay	98.51	4.10	3.55
Bremen	97.46	4.06	3.65
Cenicafe	89.25	3.72	3.37
Chapeton	82.94	3.46	2.91
El Cedral	91.94	3.83	3.46
El Jazmin	91.12	3.80	3.32
El Limon	108.45	4.52	3.32
El Sauce	80.17	3.34	2.98
El Sena	102.98	4.29	3.80
Fransisco Romero	144.95	6.04	5.48
Granja Tibacuy	59.59	2.48	2.20
Inmarco	94.28	3.93	3.52
Jorge Villamil	61.39	2.56	2.16
Julio Fernández	54.38	2.27	2.01
La Bella	93.57	3.90	3.49
La Catalina	79.90	3.33	2.95
La Montana	104.22	4.34	3.77
La Selva	81.59	3.40	3.10
La Sirena	84.34	3.51	3.17
La Trinidad	97.22	4.05	3.64
Llanadas	98.09	4.09	3.67
Luis Bustamante	79.68	3.32	2.84
Luker	79.79	3.32	2.93
Mande	113.42	4.73	4.38
Manuel María Mallarino	78.90	3.29	2.95
Manuel Mejía	86.68	3.61	3.28
Maracay	94.54	3.94	3.42
Miguel V	63.73	2.66	2.36

Estaciones	Precipitación promedio máxima anual en 24 horas	Intensidad promedio máxima anual en 24 horas	μ_{24}
Misiones	69.08	2.88	2.61
Naranjal	90.34	3.76	3.47
Ospina Pérez	65.36	2.72	2.35
Paraguacito	86.86	3.62	3.39
Peñol	76.63	3.19	2.83
Planta de Tratamiento	88.17	3.67	3.39
Pueblo Bello	93.65	3.90	3.45
Rafael Escobar	74.67	3.11	2.79
Rosario	83.30	3.47	3.16
Santa Ana	83.96	3.50	3.15
Santa Bárbara	52.77	2.20	2.03
Santa Helena	153.77	6.41	5.58
Santa Ines	79.35	3.31	2.84
Santagueda	78.84	3.28	2.95
Santiago Gutiérrez	59.34	2.47	2.23
Sireno	82.55	3.44	3.03
Yacopi	88.69	3.70	3.33

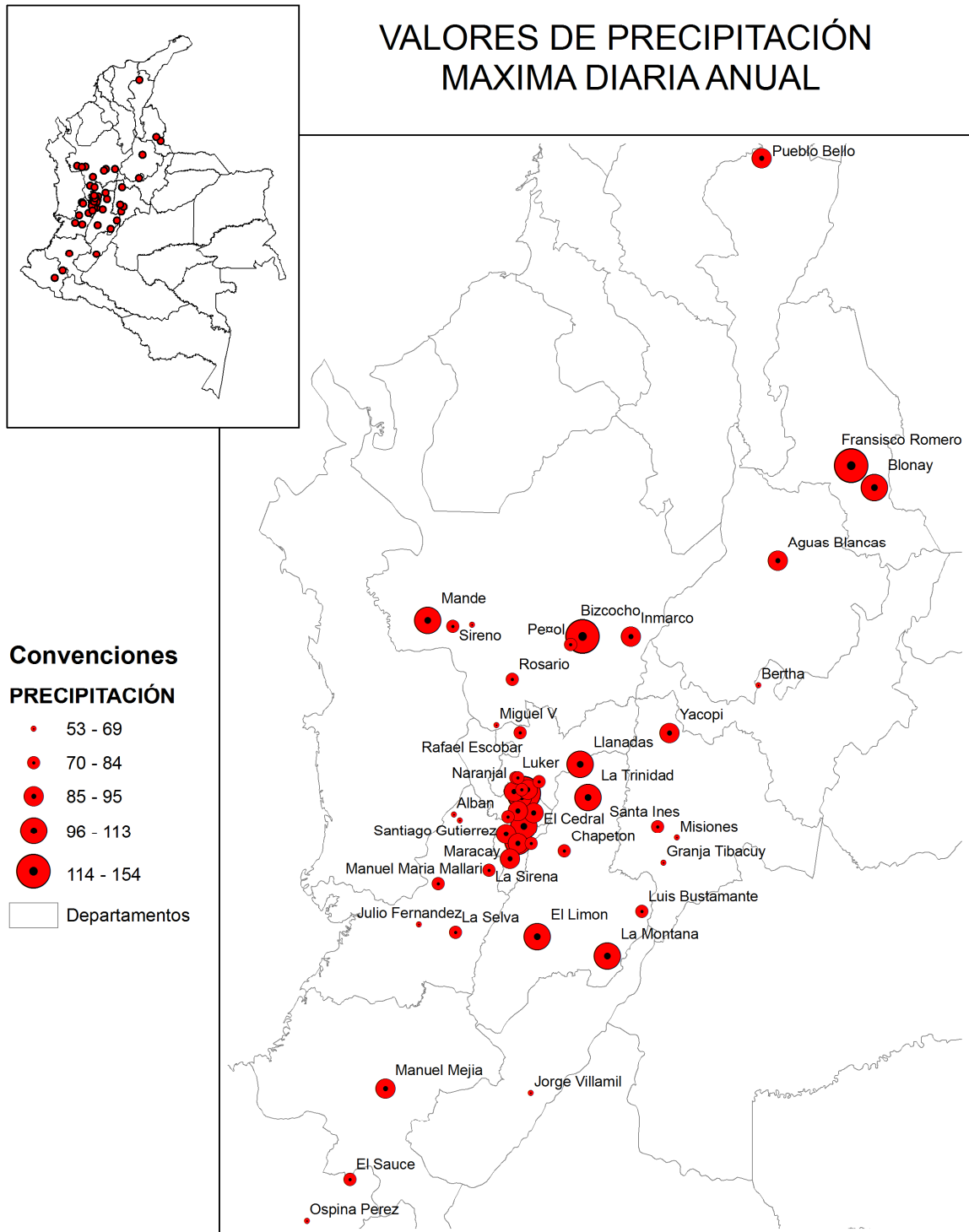


Figura 5-2 Precipitación promedio máxima de 24 horas anual.

5.1.1 Estimación de curvas IDF con información escasa

Según la lista de chequeo mencionada anteriormente, es posible determinar las intensidades para cualquier periodo de retorno para duraciones entre 1 y 24 horas (60 a 1440 minutos) usando la metodología de Escalamiento 2 y modificando la ecuación 2-25, incluyendo las ecuaciones 5-1 y 5-2 de la siguiente manera:

$$I_t^T = \left([0,88 m - 0,004] + \left[\frac{0,12 m}{0,5772} \cdot \hat{y} \right] \right) (t / 1440)^\theta, \quad 5-3$$

en donde:

I_t^T = es la intensidad para un periodo de retorno T y una duración t , expresada en mm/hora

t = es la duración de la tormenta en minutos

T = periodo de retorno en años

m = es la intensidad promedio diaria anual (mm/hora)

θ = es el exponente de escalamiento -0.829

$\hat{y} = -\ln[-\ln(1 - (1/T))]$ es la transformación del periodo de retorno T

Si se desea obtener valores de precipitación o de intensidad para rangos menores de una hora, se sugiere encontrar el valor de intensidad de 1 hora mediante la ecuación 5-3 transformarla en precipitación de 1 hora y usar los estimativos empíricos de Bell descritos en la ecuación 2-34.

5.2 Sobre la estimación de caudales máximos a partir de curvas IDF

Una de los usos más comunes de las curvas IDF se da en los modelos de lluvia-escorrentía. Por ello presentamos un ejemplo de aplicación del método racional en una cuenca ficticia o piloto, con el fin de cuantificar los estimativos de los caudales máximos en tal cuenca, como resultado de la aplicación de los diversos métodos de estimación de las curvas IDF implementados en este trabajo.

Las cuencas “pilotos” son cuencas de 1 km² de área, con un coeficiente de escorrentía, definido para una superficie muy impermeable y con una condición antecedente del suelo con alta humedad, igual a 0,70, generalmente usado para estimar caudales máximos, usando un tiempo de concentración igual a las duraciones de la lluvia usadas en este trabajo, entre 1 y 24 horas. Se estimaron los caudales máximos como resultado de eventos intensos de precipitación usando cada uno de los métodos implementados en la investigación, para cada duración y para cada periodo de retorno. En la Tabla 5-2 a la Tabla 5-4 Se muestran los caudales estimados para la estación Luis Bustamante, Misiones y Santa Ana respectivamente.

Tabla 5-2 Caudales estimados (m^3/s) usando la metodología tradicional de IDF con la función Gumbel y la metodología de Escalamiento 1, para la estación Luis Bustamante.

Duración (horas)	Valores con la función Gumbel						Valores con la metodología de Escalamiento 1					
	Periodo de retorno (años)						Periodo de retorno (años)					
	2.33	5	10	25	50	100	2.33	5	10	25	50	100
1	7.36	8.78	9.93	11.38	12.46	13.54	8.44	10.42	11.98	13.91	15.31	16.69
2	4.80	5.77	6.56	7.56	8.30	9.03	4.83	5.96	6.85	7.95	8.75	9.54
3	3.56	4.26	4.82	5.54	6.07	6.60	3.48	4.29	4.94	5.73	6.31	6.88
4	2.78	3.36	3.83	4.43	4.87	5.31	2.76	3.40	3.91	4.54	5.00	5.45
5	2.28	2.81	3.23	3.77	4.17	4.57	2.30	2.84	3.27	3.79	4.18	4.56
6	1.99	2.52	2.95	3.50	3.91	4.31	1.99	2.45	2.82	3.28	3.61	3.93
7	1.78	2.32	2.76	3.31	3.72	4.13	1.76	2.17	2.49	2.89	3.18	3.47
8	1.59	2.10	2.50	3.02	3.40	3.79	1.58	1.95	2.24	2.60	2.86	3.12
9	1.44	1.89	2.26	2.73	3.07	3.41	1.43	1.77	2.03	2.36	2.60	2.83
10	1.33	1.74	2.08	2.50	2.81	3.12	1.32	1.63	1.87	2.17	2.39	2.60
11	1.23	1.61	1.91	2.30	2.59	2.88	1.22	1.50	1.73	2.01	2.21	2.41
12	1.14	1.49	1.77	2.13	2.39	2.66	1.14	1.40	1.61	1.87	2.06	2.25
13	1.08	1.39	1.64	1.96	2.20	2.43	1.07	1.32	1.51	1.76	1.93	2.11
14	1.02	1.31	1.54	1.84	2.06	2.27	1.00	1.24	1.42	1.65	1.82	1.98
15	0.97	1.25	1.47	1.75	1.96	2.17	0.95	1.17	1.35	1.56	1.72	1.88
16	0.92	1.17	1.38	1.65	1.85	2.04	0.90	1.11	1.28	1.48	1.63	1.78
17	0.87	1.11	1.31	1.56	1.75	1.94	0.86	1.06	1.22	1.41	1.56	1.70
18	0.83	1.06	1.24	1.48	1.65	1.83	0.82	1.01	1.16	1.35	1.49	1.62
19	0.79	1.01	1.18	1.41	1.57	1.73	0.78	0.97	1.11	1.29	1.42	1.55
20	0.76	0.96	1.13	1.34	1.49	1.65	0.75	0.93	1.07	1.24	1.36	1.49
21	0.72	0.92	1.08	1.28	1.42	1.57	0.72	0.89	1.03	1.19	1.31	1.43
22	0.70	0.89	1.04	1.23	1.38	1.52	0.70	0.86	0.99	1.15	1.26	1.38
23	0.68	0.86	1.01	1.19	1.33	1.47	0.67	0.83	0.95	1.11	1.22	1.33
24	0.65	0.83	0.97	1.15	1.28	1.42	0.65	0.80	0.92	1.07	1.18	1.28

Tabla 5-3 Caudales estimados (m^3/s) usando la metodología tradicional de IDF con la función Log Normal y la metodología de Escalamiento 1, para la estación Misiones.

Duración (horas)	Valores con la función Gumbel						Valores con la metodología de Escalamiento 1					
	Periodo de retorno (años)						Periodo de retorno (años)					
	2.33	5	10	25	50	100	2.33	5	10	25	50	100
1	7.65	8.98	10.00	11.20	12.06	12.88	8.28	9.42	10.26	11.24	11.92	12.56
2	4.95	5.82	6.48	7.27	7.83	8.37	4.62	5.25	5.72	6.26	6.64	7.01
3	3.50	4.13	4.62	5.19	5.61	6.00	3.28	3.73	4.06	4.45	4.72	4.98
4	2.75	3.26	3.65	4.12	4.45	4.78	2.57	2.93	3.19	3.49	3.70	3.91
5	2.25	2.68	3.01	3.41	3.69	3.97	2.13	2.43	2.64	2.89	3.07	3.24
6	1.92	2.30	2.59	2.93	3.18	3.43	1.83	2.08	2.27	2.48	2.63	2.78
7	1.67	2.00	2.26	2.57	2.79	3.01	1.61	1.83	1.99	2.18	2.31	2.44
8	1.47	1.76	1.98	2.25	2.45	2.64	1.44	1.63	1.78	1.95	2.07	2.18
9	1.32	1.57	1.76	2.00	2.16	2.32	1.30	1.48	1.61	1.76	1.87	1.97
10	1.20	1.42	1.60	1.81	1.95	2.10	1.19	1.35	1.47	1.61	1.71	1.80
11	1.10	1.30	1.46	1.65	1.78	1.91	1.10	1.25	1.36	1.49	1.58	1.67
12	1.02	1.21	1.35	1.51	1.63	1.74	1.02	1.16	1.26	1.38	1.47	1.55
13	0.95	1.12	1.25	1.41	1.52	1.63	0.95	1.08	1.18	1.29	1.37	1.45
14	0.89	1.05	1.17	1.31	1.42	1.51	0.90	1.02	1.11	1.22	1.29	1.36
15	0.83	0.98	1.09	1.23	1.32	1.41	0.84	0.96	1.05	1.15	1.22	1.28
16	0.79	0.93	1.04	1.16	1.25	1.34	0.80	0.91	0.99	1.09	1.15	1.21
17	0.76	0.88	0.96	1.07	1.14	1.21	0.76	0.86	0.94	1.03	1.09	1.15
18	0.72	0.83	0.91	1.01	1.08	1.15	0.72	0.82	0.90	0.98	1.04	1.10
19	0.69	0.79	0.86	0.95	1.02	1.08	0.69	0.79	0.86	0.94	1.00	1.05
20	0.66	0.75	0.82	0.91	0.96	1.02	0.66	0.75	0.82	0.90	0.95	1.01
21	0.63	0.72	0.78	0.86	0.92	0.97	0.64	0.72	0.79	0.86	0.92	0.97
22	0.61	0.69	0.76	0.84	0.89	0.94	0.61	0.70	0.76	0.83	0.88	0.93
23	0.59	0.68	0.74	0.82	0.87	0.93	0.59	0.67	0.73	0.80	0.85	0.89
24	0.57	0.66	0.72	0.80	0.85	0.90	0.57	0.65	0.70	0.77	0.82	0.86

Tabla 5-4 Caudales estimados (m³/s) usando las metodologías Escalamiento 1 de Escalamiento 2, para la estación Santa Ana.

Duración (horas)	Valores con la metodología de Escalamiento 1						Valores con la metodología de Escalamiento 2					
	Periodo de retorno (años)						Periodo de retorno (años)					
	2.33	5	10	25	50	100	2.33	5	10	25	50	100
1	10.79	12.47	13.73	15.22	16.26	17.26	10.63	12.33	13.71	15.45	16.74	18.03
2	5.93	6.85	7.54	8.35	8.93	9.47	5.84	6.77	7.53	8.48	9.19	9.90
3	4.17	4.82	5.31	5.88	6.29	6.67	4.11	4.77	5.30	5.97	6.47	6.97
4	3.25	3.76	4.14	4.59	4.90	5.20	3.21	3.72	4.13	4.66	5.05	5.43
5	2.68	3.10	3.41	3.78	4.04	4.29	2.64	3.06	3.41	3.84	4.16	4.48
6	2.29	2.65	2.92	3.23	3.45	3.66	2.26	2.62	2.91	3.28	3.55	3.83
7	2.00	2.32	2.55	2.83	3.02	3.21	1.98	2.29	2.55	2.87	3.11	3.35
8	1.79	2.06	2.27	2.52	2.69	2.86	1.76	2.04	2.27	2.56	2.77	2.98
9	1.61	1.86	2.05	2.27	2.43	2.58	1.59	1.84	2.05	2.31	2.50	2.69
10	1.47	1.70	1.87	2.08	2.22	2.35	1.45	1.68	1.87	2.11	2.28	2.46
11	1.36	1.57	1.73	1.91	2.04	2.17	1.34	1.55	1.72	1.94	2.10	2.27
12	1.26	1.45	1.60	1.77	1.89	2.01	1.24	1.44	1.60	1.80	1.95	2.10
13	1.17	1.36	1.49	1.65	1.77	1.88	1.16	1.34	1.49	1.68	1.82	1.96
14	1.10	1.27	1.40	1.55	1.66	1.76	1.08	1.26	1.40	1.58	1.71	1.84
15	1.04	1.20	1.32	1.46	1.56	1.66	1.02	1.18	1.32	1.48	1.61	1.73
16	0.98	1.13	1.25	1.38	1.48	1.57	0.97	1.12	1.25	1.40	1.52	1.64
17	0.93	1.08	1.18	1.31	1.40	1.49	0.92	1.06	1.18	1.33	1.44	1.55
18	0.89	1.02	1.13	1.25	1.33	1.42	0.87	1.01	1.12	1.27	1.37	1.48
19	0.85	0.98	1.08	1.19	1.27	1.35	0.83	0.97	1.07	1.21	1.31	1.41
20	0.81	0.93	1.03	1.14	1.22	1.29	0.80	0.92	1.03	1.16	1.25	1.35
21	0.78	0.90	0.99	1.09	1.17	1.24	0.76	0.89	0.98	1.11	1.20	1.29
22	0.74	0.86	0.95	1.05	1.12	1.19	0.73	0.85	0.95	1.07	1.16	1.24
23	0.72	0.83	0.91	1.01	1.08	1.15	0.71	0.82	0.91	1.03	1.11	1.20
24	0.69	0.80	0.88	0.97	1.04	1.10	0.68	0.79	0.88	0.99	1.07	1.15

De los resultados obtenidos se pueden destacar los siguientes aspectos:

Las variaciones más significativas se encuentran asociadas con menores duraciones (1 o 2 horas), con diferencias en el caudal pico estimado entre 4 o 5 m³/s, lo que equivale alrededor del 15% del caudal máximo estimado, con diferencias máximas del 30%, entre el método de Escalamiento 1 y los métodos tradicionales de estimación de IDF.

En Figura 5-3 se presenta la diferencia entre el valor de caudal usando la metodología tradicional con la función Gumbel y la metodología de escalamiento 1 para la estación Luis Bustamante y en la Figura 5-4 se presenta la diferencia entre el valor de caudal usando la metodología tradicional con la función Log Normal y la metodología de escalamiento 1 para la estación Misiones.

Comparando las metodologías de Escalamiento 1 y de Escalamiento 2 se presentan diferencias en promedio inferiores del 2,5% y máximas del orden de 5% del caudal máximo estimado. Es conveniente indicar que los valores y diferencias siguen la misma tendencia de los registrados en la estimación de las intensidades, en donde el método de Escalamiento 1 presentaba los mayores valores para periodos de retorno pequeños y el método de Escalamiento 2 presentaba los mayores valores para periodos de retorno superiores a los 10 años. Para la mayoría de las estaciones estas diferencias están por debajo de los 2 m³/s incluso para las intensidades más altas, es decir, para las de 1 o 2 horas de duración. En la Figura 5-5 se presenta la diferencia entre el valor de caudal usando la metodología de escalamiento 1 y la metodología de escalamiento 2 para la estación Santa Ana.

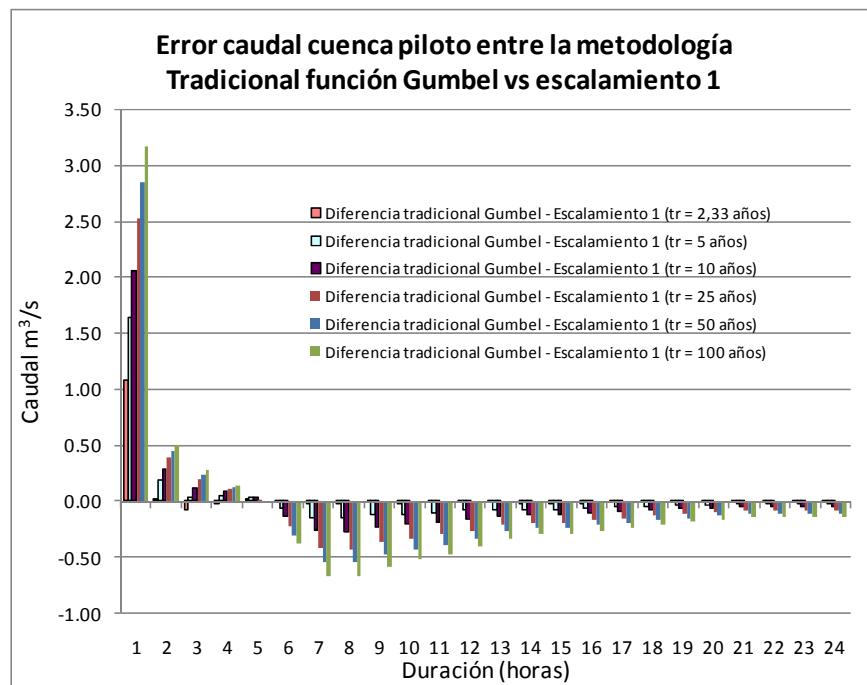


Figura 5-3 Diferencias entre los caudales estimados para la cuenca piloto, utilizando la metodología tradicional de IDF con la función Gumbel y la metodología de Escalamiento 1 para la estación Luis Bustamante.

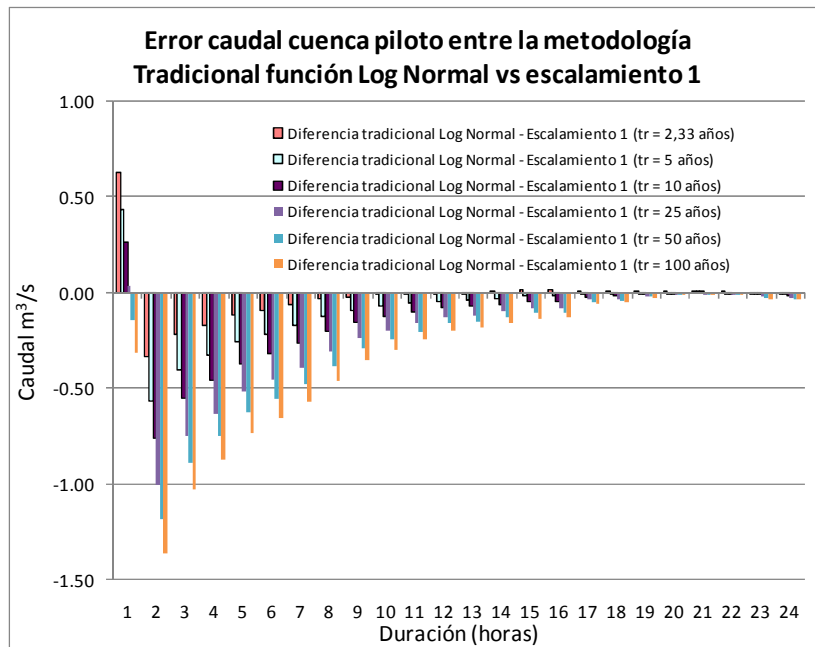


Figura 5-4 Diferencias entre los caudales estimados para la cuenca piloto, utilizando la metodología tradicional de IDF con la función Log Normal y la metodología de Escalamiento 1 para la estación Misiones.

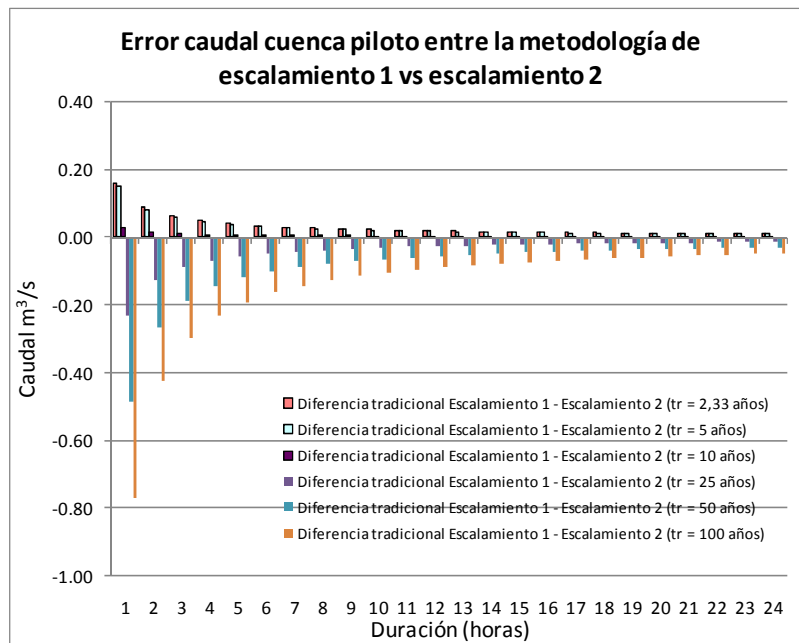


Figura 5-5 Diferencias entre los caudales estimados para la cuenca piloto, utilizando las metodologías de Escalamiento 1 y la de Escalamiento 2 para la estación Santa Ana.

Estas diferencias de los valores implican mayor seguridad en el diseño cuando se usan las metodologías de escalamiento. Además de esto, tal como se demostró anteriormente, el procedimiento para el cálculo de las intensidades resulta más sencillo en sitios con información escasa, y es más robusto desde el punto de vista de los procesos físicos implicados.

6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El trabajo pretende superar algunas de las limitaciones de la aplicación tradicional de las curvas IDF, y ofrece alternativas metodológicas que utilizan mejores y más robustas herramientas estadísticas.

Es importante mencionar que en el caso de la obtención de las curvas IDF, en algunos ámbitos, en especial en la consultoría, ha existido cierta complacencia y no se han cuestionado ni las hipótesis ni los resultados. En este trabajo se indican algunas de las principales limitaciones, y se trata de enfrentarlas mediante elementos prácticos, pero no soluciona todos los interrogantes encontrados. Dentro de las dificultades existentes se destacan: la definición de los rangos de duración (continuos o separados entre 5 a 60 minutos y de 60 minutos en adelante), la separación de registros de tormentas estadísticamente independientes y la estimación de parámetros en las funciones que relacionan de manera más adecuada a los fenómenos, entre otros.

En este trabajo se ha demostrado que las metodologías basadas en la propiedad de escalamiento simple, estiman de mejor manera las curvas IDF, y que existe un potencial elevado para su mejor apreciación usando funciones estables; las discrepancias en las magnitudes encontradas frente a la metodología tradicional poseen diferencias relativamente discretas, sin embargo, el procedimiento tiende hacia consideraciones más racionales y se aleja de los argumentos netamente heurísticos.

El enfoque de la investigación trató de separar las metodologías tradicionales, que utilizan herramientas estadísticas de forma indiscriminada, pasando por un modelo un poco más elaborado desde el punto de vista teórico, que se basa en la invarianza de la lluvia, hasta llegar a teorías poco usadas, como las funciones estables, pero que describen de una mejor manera el comportamiento de sistemas altamente variables.

Por medio de la información recopilada y de las metodologías usadas en este trabajo, las conclusiones se pueden dividir en varios grupos, las relacionadas con los datos y la climatología, las relacionadas con los métodos y las que tienen influencia en los diseños.

Los datos usados son, relativamente, una información privilegiada ya que en el medio es difícil encontrar registros de precipitación horaria, sin embargo, esta información se queda corto para ser implementado en muchos diseños, puesto que la mayoría de obras pequeñas usan tiempos de concentración inferiores de 30 minutos. Esto pone de presente que existe un vacío en la obtención y el procesamiento de datos; los datos horarios impiden encontrar umbrales o cambios en las propiedades de las escalas de minutos. Muchos autores, como Wilches (2004), han encontrado cambios de estas propiedades en la escala entre una y dos horas, mientras que autores como Burlando y Rosso (1996) han reportado este punto de cambio cerca a los 45 minutos.

La climatología del país es muy variable, por lo que tratar de regionalizar formulas basados en elementos hidrológicos como la precipitación resulta una labor complicada; ya que el objetivo es tratar de entender cómo funcionan las diferentes variables, cuáles son los principios que las rigen y cuáles son las relaciones que se pueden observar y de esta forma encontrar cuáles son los métodos y modelos que mejor describen la variabilidad.

La estimación de IDF de forma tradicional, es decir, contando con las series de cada duración y aplicándole una función de distribución de probabilidad, es un proceso simple desde el punto de vista computacional, pero la dificultad radica principalmente en que los registros no son fáciles de recopilar. Si se desea integrar esta metodología para el desarrollo de modelos de lluvia escurrentía, se debe contemplar en qué se desea enfatizar, si en la seguridad de los diseños o si en el análisis de los datos. Con respecto a la seguridad, conveniente usar la metodología tradicional con la función Gumbel puesto que las magnitudes que arroja este método son mayores que si se usan otras funciones de probabilidad y en el segundo caso, con relación a los ajustes de los datos, es preferible usar la metodología de escalamiento.

Los resultados del presente trabajo confirman lo indicado por otros investigadores que indican que para la elaboración de las curvas IDF, deben procesarse los registros pluviográficos completamente y no sólo unas cuantas tormentas en el año. Sin embargo, se deben implementar estudios que se centren en las precipitaciones de corta duración (inferiores a 1 hora) ya que dadas las dificultades de consecución de registros, se ha optado por usar relaciones empíricas, muchas de ellas que sólo ajustan datos a funciones, pero no exploran ni dan claridad acerca de los fenómenos físicos implicados. Sin embargo, desde el punto de vista práctico se considera adecuado usar estimativos como los de Hershfield (1969), por su sencillez, o la ecuación encontrada por Bell (ecuacion 2-34)

Los factores adimensionales encontrados en este trabajo, como parte de los estimativos usados por las metodologías tradicionales llegan a valores superiores a 1.50 en algunas estaciones. El valor promedio identificado es de 1.11, el cual es mayor al de 1.07 encontrado por Wilches (2001) para Antioquia, y más cercano al valor de 1.13 encontrado por Hershfield en 1969 para los Estados Unidos, el cual es usado sin muchas modificaciones desde entonces.

Las diferencias encontradas en los factores adimensionales usando la metodología tradicional usando la función Gumbel y Log Normal, pese a que son mínimas, impide confirmar la conclusión de Cao (1974) de que estos factores permanecen constantes con relación a la función de probabilidad.

Se deben tratar de explorar fenómenos no estacionarios como el ENSO con mayor profundidad, para tratar de indicar como pueden ser las variaciones esperadas y no usar datos y elaborar diseños basados en una información general; la particularización de estos fenómenos permite realizar diseños más depurados, que en última medida se traducen en seguridad y economía.

En el análisis de las teorías de escalamiento se observa que los resultados, que fueron los obtenidos por el método de "PWMs", son adecuados para su uso en procesos

estocásticos como los eventos extremos en hidrología, debido a que es un método simple, en su comprensión y aplicación, además, no presenta los problemas computacionales frente a otros métodos ya estudiados, como la estimación de momentos de máxima verosimilitud.

Pese a que este trabajo no llegó a profundizar las relaciones entre parámetros fisiográficos con la teoría de escalamiento o de funciones estables, se debe tratar de profundizar en este aspecto, Wilches (2001) y Yu et al. (2004) lograron esbozar algunas de estas relaciones, en especial la que existe entre la altura sobre el nivel del mar donde están ubicadas las estaciones analizadas y el exponente de escalamiento.

Como parte de las implicaciones prácticas encontradas en esta investigación, el uso de funciones o metodologías que relacionan fenómenos de invarianza en la escala, es posible afirmar que los valores de intensidad que arrojan tales métodos son mayores que los de las metodologías tradicionales para las precipitaciones de corta duración (de 1 a 2 horas), mientras que las diferencias porcentuales encontradas para precipitaciones mayores son relativamente pequeñas, en promedio para todas las duraciones se tienen diferencias del 7% y máximas del orden del 25% y la metodología en si permite relacionar cambios en la escala, lo cual es un idea más robusta que la estimación tradicional de IDF

Este trabajo se aparta de la recomendación de Wilches (2001) de usar simplemente el análisis de frecuencia, ya que aunque en ese trabajo se implementó el método propuesto por Burlando y Rosso (1996), las variables usadas y los parámetros exigidos, complican la aplicabilidad del método, y por ende la obtención de resultados. La recomendación desde el punto de vista práctico es aplicar modelos que usen relaciones de invarianza de escala de la lluvia, en especial se recomienda el uso del método de escalamiento 2 de Yu et al (2004), preferiblemente si se dispone de información de precipitación a nivel horario. Aunque este modelo es excelente para estimar las intensidades de lluvia a nivel de estudios de factibilidad, sólo disponiendo de información de precipitación máxima diaria (que está disponible en nuestro medio) y el exponente de escalamiento encontrado en este estudio con valor medio de -0.829 y rango entre -0.769 y -0.883. Teniendo presente que se pueden encontrar errores promedios cercanos al 5% y máximos entre el 20% y el 30%, y pese a ser valores elevados, son diferencias relativamente normales en los estimativos hidrológicos, en especial en la determinación de valores extremos.

Se debe tratar de explorar con mayor profundidad las funciones estables, ya que estas representan mejor fenómenos altamente variables, y tratar de salvar las dificultades de no poder usar formulas "cerradas" las cuales han tenido poca acogida en algunos ámbitos profesionales por considerarlas complicadas y poco practicas.

En las diferencias porcentuales de intensidad entre la metodología de escalamiento 1 y la metodología de escalamiento 2, estimadas por medio de la ecuación 4-3 no se manifiesta una variación significativa a nivel horario, y esa diferencia porcentual se mantiene constante para todos los periodos de retorno. Sin embargo, para la mayoría de las estaciones, la metodología de escalamiento 1 arroja estimativos de intensidades más altos que la metodología de escalamiento 2, para periodos de retorno cortos, específicamente para 2.33 y 5 años. Las diferencias son casi imperceptibles para periodos de retorno cercanos a los 10 años, pero a partir de este periodo de retorno la

metodología de Escalamiento 2 (Yu et al) arroja mayores valores de intensidad de lluvia, y las diferencias se incrementan a medida que aumenta el periodo de retorno.

Se han encontrado relaciones muy débiles entre el exponente de escalamiento y parámetros morfológicos, como la ubicación sobre el nivel del mar, la altura sobre el valle, etc, sin embargo, se deben estudiar otras metodologías que permitan relacionar estos datos de una forma más firme y que sirvan para ser incorporada en modelos de invarianza de escala de la lluvia, tal como lo intentaron Yu et al. (2004) en Taiwan.

Este trabajo no contó con registros que permitiesen demostrar la validez de la fórmula de Bell (ecuación 4-32); sin embargo, se encontró que esta fórmula arroja valores muy similares a los descritos por Hershfield. La inclusión de esta fórmula empírica en esta investigación se ha hecho para proporcionar un método que permitiera incluir las duraciones menores de una hora, ya que muchos de los cálculos hidrológicos estiman duraciones muy cortas (menores de 1 hora) para determinar factores como tiempo de concentración o la intensidad.

Se describe una manera para determinar valores de precipitación para duraciones entre 1 a 24 hora, usando poca información (precipitación promedia máxima diaria anual y el exponente de escalamiento), ver ecuación 5-3. Esta forma de estimar la intensidad cuando es comparada con los valores obtenidos por el método de Escalamiento 2 usando todos los datos horarios, se obtienen diferencias en promedio inferiores al 5% y variaciones máximas entre el 20% y 25%.

Al realizar estimados de caudales usando las metodologías tradicionales y las metodologías de escalamiento, se concluye que las variaciones más significativas se encuentran asociadas con menores duraciones (1 o 2 horas), con diferencias en el caudal pico estimado entre 4 o 5 m³/s, lo que equivale alrededor del 15% del caudal máximo estimado, con diferencias máximas del 30%, entre el método los métodos de Escalamiento y los métodos tradicionales de estimación de IDF.

BIBLIOGRAFÍA

- ADLER, R. J., FELDMAN, R. y TAQQU, M. A Practical Guide to Heavy Tailed Data. Boston: Birkhauser, 1998
- ANG, Alfredo y TANG, Wilson. Decision, Risk and reliability En: Probability concepts in engineering, planning and design. New York : John Wiley and Sons, 1984. v.2
- ARNELL, V., HARREMOES P, JENSEN N, JOHANSE N. B. y NIEMEZYNOWICS. Review of rainfall data application for design and analysis. En: Water Science and Technology .1984, Vol. 16, no. 8-9 p.1-45
- BACCHI, Baldassare. Analisi e previsione statistica delle piogge di breve durata e forte intensita En: curso de actualización : El riesgo hidrogeológico y la protección hidráulica de los territorios fuertemente antropizados, Medellín: s.n., 1998.
- BAGHIRATHAN, V. R., SHAW, E. M., Rainfall depth–duration–frequency studies for Sri Lanka. En: Journal of Hydrology. May, 1978, Vol. 37, no.3 - 4 p. 223 – 239.
- BEIRLANT, Jan, TEUGELS, Josef y VYNCKIER, Petra. Practical analysis of extreme values. S.I. : Leuven University Press, 1996.
- BELL, Charles Frederick. Generalized rainfall-duration-frequency relationships. En: Journal of hydraulics division. January, 1969, Vol. 95. P. 311-327
- BENDJOUDI, H., HUBERT, P., SCHERTZER, D. y LOVEJOY, S. Multifractal point of view on rainfall intensity–duration–frequency curves. 1997
- BENJAMIN, Jack y CORNELL, Allin. Probabilidad y estadística en ingeniería Civil. Bogotá : McGraw Hill, 1981.
- BERNARD, M. Merry. Formulas for rainfall intensities of long duration En: Transactions of the American society of civil Engineers. 1932, Vol. 96.
- BOCACCI. O. Rainfall as the basis urban-runoff- Experience and practice in Yugoslavia. En: Water Science and Technology. 1984, Vol, 16 no. 8-9, p. 102-108.
- BOTERO, B. Alejandro León y Muñoz G. Sergio. Obtención de curvas intensidad frecuencia duración para el departamento de Antioquia. Medellín, 1997, 53 p. Trabajo de grado (Ingeniería Civil). Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas.
- BURLANDO, Paolo y ROSSO, Renzo. Scaling and Multiscaling models of depth-duration-frequency curves for storm precipitation. En: Journal of Hydrology. 1996, no.187, p. 45-64.
- CAO, Carlo. A contribution to statistical depth-duration-frequency analysis. En: Journal of Hydrology. 1974, N°22, p. 109-129.
- CARDENAS B, Juan Carlos, MARÍN P. Olga Lucía y LOPEZ O. Isabel Cristina. Curvas de masas para las estaciones pluviográficas de las Empresas Públicas de Medellín que poseen curvas Intensidad Duración Frecuencia. Medellín, 1995 Tesis de grado. (Ingeniería Civil). Universidad de Medellín. Facultad de Ingeniería Civil.
- CHEN, Cheng L. Rainfall intensity-Duration-Frequency formulas. En: Journal of hydraulics engineering. 1983, Vol. 109, no. 12, p 1603-1621..

- CHOW, Ven te, MAIDMENT, David R. y MAYS, Larry W. Hidrología aplicada. Santa Fé de Bogotá : McGraw-Hill, 1994.
- CHOW, Ven te. Statistical and probability analysis of hydrological data. En: Handbook of applied hydrology. New York: McGraw Hill, 1964. Parte. 1
- CHOW, Ven te. The log-probability law and its engineering applications. En: Proceedings American Society of Civil Engineers, 1954.
- COMMITTEE ON TECHNIQUES FOR ESTIMATING PROBABILITIES OF EXTREME FLOODS. Estimating probabilities of extreme floods, methods and recommended research. Washington : National Academy Press, 1988.
- CONG, Shuzheng, LI Yuanzhang, VOGEL, Jhon y SHAAKE Jhon. Identification of the underlying distribution form of precipitation by using regional data. En: Water Resources Research. 1993, Vol. 29, no. 4, p.1103-1111.
- DAHMEN E. R. y HALL M.J. Screening of hydrological data: Test for stationarity and relative consistency. International Institute for land reclamation an improvement publication N° 49, 1990.
- DE MICHELE, C., KOTTEGODA, N.T., ROSSO, R. IDAF (intensity–duration–area–frequency) curves of extreme storm rainfall: a scaling approach. En: Water Science and Technology. 2002, Vol. 25, no. 2, p. 83–90.
- DIXON, J. W. Planning and development, En: CHOW, Ven Te. Handbook of applied hydrology. New York : McGraw Hill, 1964.
- EAGLESON, Peter. Climate, soil and vegetation 2. The distribution of annual precipitation derived from observed storm sequences. En: Water Resources Research. Octubre, 1978, Vol. 14, no. 5, p. 713-721.
- EMBRECHTS, P. y SAMORODNITSKY, G. (1995). Sample quantiles of heavy tailed stochastic processes. En: Stochastic Processes and Their Applications. Octubre, 1995, Vol. 59, no. 2 p. 217-233
- EMPRESAS PÚBLICAS DE MEDELLÍN. Anuario hidrometeorológico. Medellín : Empresas Públicas de Medellín, 1991.
- EMPRESAS PÚBLICAS DE MEDELLÍN. Normas de diseño de acueducto y alcantarillados y aguas residuales. Medellín : Empresas Públicas de Medellín, 1989.
- Fama, E. The behavior of stock market prices. En: The Journal of Business. January, 1965, Vol. 38, no. 1. P. 34-105
- Feller, W. An Introduction to Probability Theory and its Applications. New York : Wiley, 1971. Vol. 2
- FROEHLICH, David C Intermediate-duration-rainfall intensity equations. En: Journal of Hydraulic Engineering. Octubre, 1995, Vol. 121, no 10, p. 751-756.
- GERT, A., WALL, D.J., WHITE, E.L., DUNN, C.N. Regional rainfall intensity–duration–frequency curves for Pennsylvania. En: Water resources bulletin. 1987, Vol. 23, no. 3, p. 479-485
- GILMA Charles. Rainfall. En: CHOW, Ven Te. Handbook of applied hydrology. New York : McGraw Hill, 1964

- GRENWOOD, Arthur, LANDWEHR, Maciunas, MATALAS, N.C. y WALLIS, J.R. Probability weighted moments: Definition and relations to parameter of several distributions expressible in inverse form. En: *Water Resources Research*. 1979, Vol. 15, no. 5, p. 1049-1054.
- GUPTA, Vijay K. Multiscaling theory of flood peaks: Regional quantile analysis. En: *Water Resources Research*. Diciembre, 1994, Vol. 30, no. 12, p. 3405-3421.
- GUPTA, Vijay K. y WAYMIRE, Edward. A statistical analysis of mesoscale rainfall as a random cascade. En: *Journal of applied meteorology*. Febrero, 1993, Vol. 32, no. 2.
- GUPTA, Vijay K. y WAYMIRE, Edward. Multiscaling properties of spatial rainfall and river flow distributions. En: *Journal of Geophysical Research*. Febrero, 1990, Vol. 95, no. D3.
- GUPTA, Vijay K. y WAYMIRE, Edward, Multiscaling properties of spatial rainfall and river flow distributions. En: *Journal of Geophysical Research*. 1990, Vol. 95. no.D3.
- HEREDIA C., Edison. Una metodología de análisis regional de frecuencias de lluvias intensas adecuada para zonas bajo efectos del niño. [Online]. En: CADIR, Eric, GÓMEZ, Gustavo, GALARRAGA, Remigio y FERNÁNDEZ-JAUREGUI, Carlos. Consecuencias climáticas e hidrológicas del evento El Niño a escala regional y local. Incidencia en América del Sur. Unesco, 1997 (Citada: Diciembre 10 de 2008) <http://www.unesco.org.uy/phi/libros/enso/heredia2.html>
- HERSHFIELD, D. M. Some statistical properties of short duration rainfall. En: *Water Science and Technology*. 1984, Vol. 16, no. 8-9. P. 101-108.
- HERSHFIELD, D. M. Rainfall frequency atlas of the United States for durations from 30 minutes to 24 hours and return periods from 1 to 100 years, Technical Paper 40, US Department of Commerce, Weather Bureau, Washington, 1961.
- HOSKING J. R. M. and WALLIS James. R. Regional frequency analysis: an approach based on L-moments. New York : Cambridge University Press. 1997.
- HUBERT, P., BENDJOUDI, H., SCHERTZER, D. y LOVEJOY, S., Multifractal taming of extreme hydrometeorological events. En: *The Extremes of the Extremes: extraordinary floods* : IAHS Publication no. 271, 2002. pp. 51–56.
- JAVELLE, P., GRE´SILLON, J.M. y GALE´A, G. Discharge–duration–frequency curve modeling for floods and scale invariance. *C. R. Acad. Sci. Paris Earth Planet. Sci.* 329, 1999. P. 39–44
- KITE, G. W. Frequency and risk analyses in hydrology. Fort Collins Colorado : Water Resources Publications, 1977
- KOTHYARI Umesh C. and GARDE Ramchandra J. Rainfall intensity-duration-frequency formula for India. En: *Journal of Hydraulics Engineering*. Febrero, 1992, Vol. 118 no. 2. P. 323-335.
- KOUTSOYIANNIS, D., BALOUSTSOS, G. Analysis of a long record of annual maximum rainfall in Athens, Greece, and design rainfall inferences. En: *Natural Hazards*. 2000, Vol. 22, no.1, p. 31–51.

- KOUTSOYIANNIS, D., Foufoula-Georgiu, E. A scaling model of storm hyetograph. En: Water Resources Research. 1993, Vol. 29 no.7, p. 2345–2361.
- KOUTSOYIANNIS, D., KOZONIS, D. y MANETAS, A. A mathematical framework for studying rainfall intensity–duration–frequency relationships. En: Journal of Hydrology. 1998, Vol. 206, no. 1-2, p.118–135.
- KUMAR, P., GUTTORP, P., y FOUFOULA-GEORGIU, E. (1994). A probability-weighted moment test to assess simple scaling. En: Stochastic Hydrology and Hydraulics. 1994, Vol. 8, 173-183.
- LANDWEHR Maciunas y MATALAS N.C. Probability Weighted moments compared with some traditional techniques in estimating Gumbel parameters and quantiles.. En: Water Resources Research.1979, Vol. 15, no 5, p.1055-1064.
- MANDELBROT, B. New methods in statistical economics. En: The Journal of Political Economy. 1963, Vol. 71, p.421.
- MEJÍA, J. F., y POVEDA, G. Ambientes atmosféricos de sistemas convectivos de mesoescala sobre Colombia durante 1998 según la TRMM y el Re-análisis NCEP/NCAR. En: Revista Academia Colombiana de Ciencias. 2005, Vol. 29, no.113, p. 495-514.
- MENABDE, M., SEED, A. y PEGRAM, G. A simple scaling model for extreme rainfall. En: Water Resources Research.1999, Vol. 35, no.1, p. 335–339.
- MESA, Oscar, POVEDA, Germán y CARVAJAL, L. Fernando. Introducción al clima de Colombia. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Facultad de Minas. 1997.
- MILLER, J.F., FREDERICK, R.H. y TRACEY, R.J. Precipitation frequency Atlas of the Conterminous Western United State, NOAA Atlas 2, National Weather Service, Silver Spring, Maryland, 1973.
- MONSALVE, Germán. Hidrología en la ingeniería. Santa Fé de Bogotá : Escuela Colombiana de Ingeniería, 1995.
- MORALES, J. E., y Poveda, G. Diurnally-driven scaling properties of Amazonian rainfall fields. I: Fourier spectra and order-q statistical moments. En: Journal of Geophysical Research. Sometido.
- NGUYEN V. T. V., NGUYEN T. D. y WANG H. Regional estimation of short duration rainfall extremes. En: Water Science and Technology. 1998, Vol. 37, no. 11, p.15-19.
- NIEMCZYNOWICS, J. Areal intensity–duration–frequency curves for short rainfall events in Lund. En: Nordic. Hydrol. 1982, Vol. 13, p. 928–934.
- NOLAN, J. P. Continuity of symmetric stable processes. En: Journal of Multiv. Analysis. 1989a, Vol. 29, no. 84
- NOLAN, J. P. Numerical calculation of stable densities and distribution functions. Commun. Statist. En: Stochastic Models. 1997, Vol. 13, no. 4, p. 759-774

- NOLAN, J. P. Multivariate stable distributions: approximation, estimation, simulation and identification. In R. J. Adler, R. E. Feldman, and M. S. Taqqu (Eds.), *A Practical Guide to Heavy Tails*. Boston: Birkhauser, 1998a. p. 509-526.
- NOLAN, J. P. Parameter estimation and data analysis for stable distributions. En: *IEEE Proceedings of the 31st Asilomar Conference on Signal Processing*, 1998b.
- NOLAN, J. P. Maximum likelihood estimation of stable parameters. En: O. E. Barndor-Nielsen, T. Mikosch, and S. I. Resnick (Eds.), *Levy Processes: Theory and Applications*. Boston: Birkhäuser, 2001a. p. 379-400.
- NOLAN, J. P. (2008b). *Stable Distributions - Models for Heavy Tailed Data*. Boston: Birkhäuser. Unfinished manuscript, Chapter 1 [Online] at academic2.american.edu/~jpnolan.
- NOLAN, J. P. *Stable Distribution Capítulo 1* [Online] Math/Stat Department American University, 1999 www.cas.american.edu/~jpnolan.
- OSTER, Remy. Las precipitaciones en Colombia. En: *Colombia Geográfica*. Instituto Geográfico Agustín Codazzi. 1979, Vol. 6, no.2.
- OVER, Thomas y GUPTA, Vijay K. Statistical analysis of mesoscale Rainfall: Dependence of random cascade generator on large-scale forcing. En: *Journal of applied meteorology*. 1994, Vol. 33, no 12.
- PILGRIM, David H. Bridging the gap between flood research and design practice. En: *Water Resources Research*. 1986, Vol. 22, no. 9, p.1655-1765.
- POVEDA, G., La Hidroclimatología de Colombia: Una síntesis desde la escala interdecadal hasta la escala diaria. En: *Revista Academia Colombiana de Ciencias*. 2004, Vol. 28, no.107, p. 201-222.
- POVEDA, G., VÉLEZ, J. I., O. J. MESA, y co-autores, Linking Long-term Water Balances and Statistical Scaling to Estimate River Flows along the Drainage Network of Colombia. En: *Journal of Hydrologic Engineering*. January-February 2007, Vol. 12, no.1, p. 4-13.
- POVEDA, G., MESA, O. J., ARIAS, P. A., SALAZAR, L. F., MORENO, H. A., VIERIA, S. C., AGUDELO, P.A., TORO, V.G. y ÁLVAREZ J. F. Diurnal cycle of precipitation in the tropical Andes of Colombia. En: *Monthly Weather Review*. 2005, Vol. 133, no.1, p. 228-240.
- RANZI, Roberto. Valutazione delle portate al colmo di piena in un bacino alpino con un modello di trasformazione afflusi-defflusi. *La difesa idraulica del territorio*. Università di brescia, dipartimento di ingegneria civile, Editoriale Bios 1996.
- RAO, Dounthamsetti Veerabbadra. Three-parameter probability distributions. En: *Journal of the hydraulics division*. 1981, Vol. 107, no. HY3, p.339-357.
- RAUDKIVI, Arved J. *An Advance introduction to hydrological processes and modeling*. New York : Oxford Pergamon Press, 1979.
- REMENEIRAS, G. *Tratado de hidrología aplicada*. Editores técnicos asociados : Barcelona, 1974.

- RESTREPO, P.J. y EAGLESON, Peter. Identification of independent rainstorms. En: Journal of hydrology. 1982, Vol. 55, no. 1-4, p. 303-319.
- RODRIGUEZ-ITURBE, Ignacio, GUPTA, Vijay K, y WAYMIRE, Edward. Scale in the modeling of temporal rainfall. En: Water Resources Research. 1984, Vol. 20, no 11, p.1611-1619.
- ROSSO, R., BURLANDO, P. Scale invariance in temporal and spatial rainfall. En: Proceedings XV general Assembly European Geophysical Society, 23–27 April, Copenhagen, Annales Geophysicae, 145, 1990
- SALAS, J.D, SMITH, R, TABIOS G y HEO J. Statistical computer techniques in hydrology and water resources. Colorado State University, 1992.
- SIVAPALAN, M., BLOSCHL, G. Transformation of point rainfall to areal rainfall: intensity–duration–frequency curves. En: Journal of Hydrology. 1998, Vol. 204, no. 1-2, p. 150–167.
- SMITH, James. Precipitation En: MAIDMENT David R,. Handbook of hydrology. New York : McGraw Hill, 1993.
- SMITH, Ricardo. Conferencia de estimación de caudales máximos. En : Curso de actualización : El riesgo hidrogeológico y la protección hidráulica de los territorios fuertemente antropizados. Medellín: s.n., 1998.
- SMITH, J.A. Representation of basin scale in flood peak distributions. En: Water Resources Research. 1992, Vol. 28, no.11, p. 2993–2999.
- SNOW J. W. The climate of Northern South America. En: SCHWERDTFEGGER, Werner. Climates of Central and South America. World Survey of Climatology Volume 12.
- STEDINGER, Jeri, VOGEL, Richard and FOUFOULA-GEORGIU Efi. Frequency analysis of extreme events. En: MAIDMENT David R,. Handbook of hydrology. New York : McGraw Hill, 1993.
- UCHAIKIN, V. V. y ZOLOTAREV, V. M. Chance and Stability. Utrecht : VSP Press, 1999
- UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA-INTERCONEXIÓN ELÉCTRICA S.A. Análisis de homogeneidad de las series del sector eléctrico colombiano. Tomos I, II y III. Posgrado en Aprovechamiento de recursos hidráulicos. 1996.
- VARAS., C. Eduardo y FARÍAS de Reyes Marina. Estudio comparativo de relaciones-Intensidad-Duración-Frecuencia. En XIX congreso latinoamericano de hidráulica, Córdoba-Argentina. 2000.
- VARGAS M. Rodrigo M. y DÍAS Granados Mario. Curvas sintéticas regionalizadas de intensidad frecuencia duración para Colombia. Cali 1998.
- VELÉZ, María Victoria, SMITH Ricardo. Hidrología de Antioquia. Posgrado en Aprovechamiento de recursos hidráulicos. Secretaria de Obras Públicas Departamentales. 1997.
- VELÉZ, Jaime, POVEDA, Germán y MESA, Oscar. Balances hidrológicos de Colombia. Universidad Nacional, Sede Medellín. Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos, 2000.

- WILCHES, S. Estudio de las propiedades de invarianza de las precipitaciones máximas puntuales en el departamento de Antioquia, 2001 Tesis de maestría, Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.
- WILLEMS, P. Compound intensity/duration/frequencyrelationships of extreme precipitation for two seasons and two storm types. En: Journal Hydrology. 2000, Vol. 233, no.1–4, p.189–205.
- YEVJEVICH, Vujica. Probability and statistics in hydrology. Fort Collins, Colorado : Water Resources Publications, 1972.
- YU, P., YANG, T., LIN, C. Regional rainfall intensity formulas based on scaling property of rainfall. En: Journal of Hydrology. 2004, Vol. 295, p. 108-123.
- Yu, P.S., Chen, C.J. Regional analysis of rainfall intensity–duration–frequency relationship. En: Journal of the Chinese Institute of Engineers. 1996, Vol. 19 no. 4, p. 523–532.
- Yu, P.S., Chen, C.J. Potential of extending the rainfall intensity–duration–frequency relationship to non-recordingraingauges. En: Hydrology Processes. 1997, Vol. 11, no. 4, p. 377–390.