

CUANTIFICACIÓN DE SEQUÍAS: SU SEVERIDAD Y DURACIÓN EN CAUDALES MEDIOS DIARIOS Y ANALISIS DEL FENÓMENO DEL ENSO EN LA CURVA DE DURACIÓN DE CAUDALES TRADICIONAL

J. Freddy Mejía, Maria I. Montoya y Maria V. Vélez.

Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos, Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín.

RESUMEN La teoría de cruces se utilizó en este trabajo para mostrar la importancia de analizar el efecto de la persistencia de un evento de caudal determinado al realizar un diseño hidráulico. Se analizaron las propiedades de longitud, intensidad y sumas de excursiones negativas, haciendo énfasis en los valores de la curva de duración que representan las sequías (niveles de truncamiento para el 80, 85, 90 y 95 % de tiempo de excedencia); la estimación de la función de distribución de probabilidad de estas propiedades tiene importantes aplicaciones en el planeamiento de recursos hidráulicos. Las propiedades de cruces fueron analizadas en 16 series de caudal medio diario en cuencas de diferente tamaño.

Se realizó también, un análisis de las curvas de duración de caudales construidas a partir de muestras separadas de las series afectadas por la fase cálida, fría o normal del ENSO, para considerar la no-estacionariedad del proceso y tener un estimativo de cómo es el comportamiento del caudal en cada una de las fases. Las curvas de duración para las diferentes series se realizaron en 11 estaciones de registro de caudal medio diario ubicadas en la región andina de Colombia.

ABSTRACT The crossing theory was used in this work to show the importance of analyzed the effect of the persistence of one determined event of flow to make a hydraulic designs. There were analyzed the negative excursion properties of length, intensity and sums, making emphasis in the values of the flow duration curve that represent the droughts (truncation levels for 80, 85, 90 and 95 % of exceed time). The estimate of the probability distribution of these properties has important applications in the hydraulic resources planning. The crossing properties were analyzed in 16 series of daily stream flow data in different size basins.

Was made also, an analysis of the duration curves building to separates samples of the series affected by the warmer and wet phase of the ENSO or its absence, to considering the non-stationary and get an estimate of how is the behavior of the flow in each one of this phases. The duration curves to the different series was made in 11 station of medium diary flow located in Andina region of Colombia.

1 INTRODUCCIÓN

La curva de duración de caudales ha sido ampliamente utilizada por los ingenieros para el diseño de muchos proyectos civiles tales como centrales hidroeléctricas, acueductos, sistemas de riego, etc. Representa para los caudales medios, la frecuencia del flujo anual característico de un río, describe las características medias de todos los percentiles y la proporción de

tiempo en el año que un caudal observado en el río es excedido o igualado (Foster, 1933a, Mejía y Montoya, 1999 y Searcy, 1959).

Una de las dificultades al construir la curva de duración, es verificar si todos los años de registros representan las mismas características físicas y climáticas de la cuenca (LeBoutiller y Waylen, 1993b, LeBoutiller y Waylen, 1993, y Mejía y Montoya, 1999). En este trabajo, se pretende no sólo introducir la aplicación de las

propiedades de cruces en la serie completa, sino también, introducir en el análisis de las curvas de duración efectos macroclimáticos tales como los producidos por la zona de convergencia intertropical (ZCIT), el ENSO en su fase cálida y fría, etc., proponiendo, el análisis de las curvas de duración a partir de series que se consideran homogéneas, sometidas a condiciones similares, por medio de la separación de las muestras afectadas por los fenómenos de El Niño y La Niña.

La utilización de las curvas de duración, en particular los valores $Q_{90\%}$ y $Q_{95\%}$, ($Q_F(\%)$), como caudales limitantes del aprovechamiento de los recursos hídricos (sequías), indica que en el pasado los registros históricos incluyen un $(1 - F)(\%)$ de caudales medios diarios menores a los $Q_F(\%)$, sin interesar los intervalos de ocurrencia y sin importar tampoco si estos intervalos son consecutivos o no (Andrade, 1996). Para atacar éste problema se recurre a la teoría de cruces con la cual se obtiene información adicional para cualquier nivel de truncamiento. Así no sólo se estudia la persistencia con que se da cada una de las sequías (longitud) sino, también, los valores mínimos y el déficit para dicho nivel (éstas son sólo algunas propiedades de cruces).

Los análisis precisos de la probabilidad de ocurrencia y las propiedades de cruces de caudales durante sequías en las series de registros de caudal medio, ofrecen beneficios considerables en la planeación y toma de decisiones en el manejo de los recursos hidráulicos. En Sharma (1994), se describen en forma detallada las propiedades estadísticas de las propiedades de cruces y sus funciones de densidad características y en Waylen (1988), se muestra la aplicación de las propiedades sobre series de temperatura y los beneficios en la aplicación sobre cultivos.

2 DESCRIPCIÓN DE LA INFORMACIÓN

Las curvas de duración de caudales se pueden construir con datos de caudales medios diarios, semanales o mensuales, perdiéndose información a medida que la escala temporal se hace mayor porque el flujo no será generalmente

constante a lo largo del periodo en el cual se hace el promedio y el aumento en la unidad de tiempo producirá un aumento en los caudales bajos y una disminución en los caudales altos, esto debido a que los valores más altos del caudal son suavizados con los valores más bajos. Para los análisis de excursiones son necesarios, al menos, registros de caudales medios diarios con intervalos de tiempo grandes (por lo menos 10 años) que permitan medir el efecto de la persistencia de un valor de caudal dado, es decir un análisis detallado en cada nivel de truncamiento y obtener así un mínimo de excursiones. Para el análisis separado de series afectadas por el ENSO (El Niño, La Niña y "Normal") se puede realizar con registros de caudal medio mensual.

Este trabajo se realiza a partir de estaciones que cuentan con caudales medios diarios y series largas, tanto para el análisis de excursiones como para el análisis separado de series afectadas por el ENSO.

Para realizar las curvas de duración de caudales en series separadas El Niño, La Niña y "Normal" se tomaron los años de inicio de dichos fenómenos publicadas por la NOAA, National Oceanographic and Atmospheric Administration, 1999.

En el análisis separado de muestras afectadas por el ENSO en sus diferentes fases, se optó por trabajar sólo con las estaciones con registros mayores de 15 años, debido a la necesidad de obtener dentro de cada muestra más de un año afectado por la fase cálida, fría o en ausencia del ENSO, para poder al menos comparar las diferentes curvas de duración obtenidas con estas muestras separadas y la curva de duración obtenida de la forma tradicional.

Este estudio se realizó con registros hidrológicos provenientes de 2 departamentos, Antioquia y Risaralda, situados en la zona Andina colombiana cuya ubicación se muestra en la Figura 1. Algunos registros fueron suministrados por el departamento de hidrometría de las Empresas Públicas de Medellín (E.E.P.M), otros se obtuvieron de los trabajos de Evaluación de Oferta y Demanda Hídrica para el Departamento de Quindío y El Estudio de Oferta

y Demanda Hídrica de la subregión N°1 del departamento de Risaralda, que originalmente fueron obtenidas del IDEAM. Las estaciones de EE.PP.M. se encuentran cerca de sus principales proyectos de aprovechamiento hídrico, en los municipios de Medellín, Santa Rosa de Osos, San Vicente, entre otros. Las estaciones de la subregión N°1 del departamento de Risaralda, se encuentran en los municipios de Pereira, Dosquebradas, Santa Rosa de Cabal y Marsella. En la Tabla 1 se encuentra información básica de las estaciones y en la Figura 1 se puede ver la distribución espacial de las estaciones sobre los departamentos.

Algunas de las estaciones presentaban unos vacíos no muy significativos (2 o 3 días seguidos), por lo cual fue necesario realizar un previo proceso de llenado por medio del promedio entre los datos extremos de dicho intervalo. Para el análisis de Cruces, son necesarios registros de caudales en orden cronológico, completos y sin vacíos significativos ni extrapolaciones.

3 METODOLOGÍA

Después del análisis de las metodologías de Foster, año Calendario y el Empírico para la construcción de la curva de duración, se decidió realizar el análisis de cruces y el análisis separado de las series El Niño, La Niña y "Normal", por medio del método empírico, debido a la facilidad, rapidez y exactitud en la construcción de las curvas de duración.

4 ANÁLISIS DE CRUCES

La mayoría de las técnicas matemáticas para investigar la estructura de las secuencias hidrológicas se basan en alguna forma en "Procesos de Cruces" (Cramer y Leadbetter, 1967 y Vanmarcke, 1986). Desde el momento en que la hidrología se interesó en los eventos extremos (análisis de sequías y crecientes), ha sido necesario enfatizar en la importancia de los estadísticos de "excursiones". Se entiende como "excursión", la longitud del intervalo de tiempo en que una variable, el caudal en este caso, permanece por encima o por debajo de un determi-

nado nivel. La teoría de cruces tiene que ver con las propiedades de procesos aleatorios alrededor de un nivel de truncamiento en el proceso analizado (Bras y Rodríguez-Iturbe, 1985).

El estudio de los estadísticos de las excursiones, aplicado a la curva de duración de caudales, permite medir el efecto de la persistencia de un valor de caudal dado, lo cual a su vez afecta la planeación de un proyecto. Las propiedades de las excursiones (teoría de cruces) en series de tiempo hidrológicas pueden ser usadas directamente en muchos problemas de recursos hídricos. Si X_0 determina el nivel de demanda, y si este nivel no es alcanzado, ocurre un racionamiento. Cuando se discute la frecuencia y la severidad de un racionamiento es necesario considerar el mínimo nivel del flujo requerido para diferentes actividades, el cual puede ser definido por medio de la curva de duración de caudales. Si un tipo de excursión se regionaliza o se muestra sobre un área con sus isóneas, las sequías, crecientes y fenómenos similares pueden ser estudiados por medio de sus probabilidades de recurrencia (Yevjevich, 1972).

Al seleccionar un valor arbitrario X_0 , la serie es interceptada en muchos valores y la relación del valor constante X_0 con todos los valores de X_t sirve para definir la forma de las excursiones. El parámetro no necesita ser una constante y puede ser concebido como un parámetro variable, una función determinística, una variable estocástica o una combinación de estas. Existen varias definiciones de excursiones tal como se muestra en Figura 2.

Donde:

τ_1 : Tiempo entre cruces consecutivos hacia arriba.

τ_2 : Tiempo entre cruces consecutivos hacia abajo.

τ_3 : Tiempo entre dos cruces consecutivos, el primero hacia arriba y el segundo hacia abajo (longitud de excursión positiva, *LEP*).

τ_4 : Tiempo entre dos cruces consecutivos, el primero hacia abajo y el segundo hacia arriba (longitud de excursión negativa, *LEN*).

S : Área sobre τ_3 (Suma de excursiones positivas, *SEP*).

D : Área sobre τ_4 (Suma de excursiones negativas, SEN).

L_1, L_2 : Máximo y mínimo valor en la serie sobre el tramo τ_3 y τ_4 respectivamente (intensidades de excursión, IEP e IEN).

En algunos casos es de gran interés enumerar las excursiones desde el comienzo de una serie finita. Sin embargo, los extremos de una serie son excursiones incompletas, debido a que el tipo de desviación, positiva o negativa, antes de X_1 o después de X_n no se conocen. Todas estas excursiones o eventos, son variables aleatorias y son funciones de los procesos $\{X_t\}$ y el nivel de truncamiento X_0 . La probabilidad $P(X \leq X_0) = q$ puede remplazar la constante X_0 , para hacer algunas propiedades de excursiones independientes del tipo de distribución de X (Yevjevich, 1972). Cada evento, en cada nivel de truncamiento, se considera como un proceso estocástico que produce una sequía (Woo y Tarhule, 1994). De esta forma se asocia para cada valor de caudal, la probabilidad de excedencia y un respectivo valor medio de cualquiera de las propiedades de cruces analizadas.

Se analizan cuatro niveles de truncamiento en cada serie como límites arbitrarios para definir sequías, midiendo en estos niveles las propiedades de excursiones negativas. Los niveles de truncamiento seleccionados son los percentiles 80, 85, 90 y 95 de la curva de duración de caudales construida por el método empírico.

Las distribuciones de probabilidad de las tres propiedades de cruces, en eventos de sequía, en los niveles de truncamiento seleccionados, se ajustaron a funciones de probabilidad teóricas acotadas. La bondad en el ajuste se verificó por las pruebas de Smirnov-Kolmogorov y Cramer Von-Mises. Suponiendo que los eventos son independientes para condiciones de excursiones negativas, cada subpoblación de las excursiones puede ser tratada como una variable aleatoria. El conocimiento de la distribución de probabilidad de las propiedades de cruces aquí analizadas, brinda información adicional para otras estaciones cuando la información concerniente a otra estación no se conoce. Además, se puede aso-

ciar la probabilidad ocurrencia para un límite o restricción en el diseño con respecto a las propiedades de cruces (Woo y Tarhule, 1994).

Los cálculos de cruces aplicados al caso de sequías y fallas continuas, permiten hacer una mejor planeación y operación de un proyecto, debido a que no sólo se conoce el nivel de falla (sequía), sino también información importante relacionada con ese nivel de sequía como son la duración e intensidad, es decir, se calculan las propiedades de cruces para el umbral de sequía seleccionado.

5 ANÁLISIS DEL EFECTO EL NIÑO Y LA NIÑA EN LAS CURVAS DE DURACIÓN

Ha sido ya ampliamente demostrada la influencia que el ENSO tiene en todos los procesos climáticos de Colombia, particularmente en el régimen de caudales de los ríos (Poveda, 1998).

La curva de duración por lo general, se construye con los registros de la serie, sin separar los influenciados por fenómenos climáticos como El ENSO, registros que obviamente no pertenecen a la misma población que los obtenidos en épocas normales.

Debido a la necesidad de conocer la respuesta hidrológica de la cuenca específicamente frente a la presencia del ENSO en su fase cálida y fría, se realiza un análisis en cada una de las estaciones de caudal para encontrar el mes de inicio del año hidrológico, que será aquel en que empiezan hacer efecto estos fenómenos (aunque se conoce que en la región Andina colombiana, los efectos de la fase cálida, El Niño, comienzan aproximadamente en el mes de mayo, mes cinco). Se supone, para simplificar el análisis, que todos los eventos tienen una duración de un año, comenzando a partir del mes de inicio y para todas las estaciones este mes es el mismo. El procedimiento de separación de las muestras de acuerdo a cada fenómeno, produce muestras que se suponen homogéneas por estar influenciadas cada una, por una misma anomalía.

Se construyeron las curvas de duración por el método Empírico, variando el mes de inicio

del año hidrológico desde el primer mes con cada una de las series separadas (El Niño, La Niña y "Normal"). Se comparan los caudales obtenidos en cada uno de los percentiles con los correspondientes en la serie completa así:

$$DP = \frac{(Q_{ss} - Q_c) 100}{Q_{ss}}$$

Donde la Diferencia porcentual (DP) se realiza entre cada uno de los percentiles tomados de las curvas de duración de cada una de las series separadas El Niño, La Niña y "Normal" (Q_{ss}) y los correspondientes percentiles tomados de la curva de duración de la serie completa (Q_c). Se hizo énfasis en los percentiles altos.

Después de encontrar el mes de inicio del año hidrológico para las estaciones de las regiones en estudio, se construyen las curvas de duración por el método Empírico separando cada una de las series.

Se compara los percentiles altos (caudales de sequía) correspondientes en cada curva de duración con los valores asociados a la curva de duración construida con la serie completa.

Debido a que los fenómenos de la fase cálida y fría del ENSO pueden tener efectos muy diferentes para cada año considerado, se decidió analizar para cada año la curva de duración correspondiente y presentar un gráfico con dos bandas correspondientes a El Niño y La Niña respectivamente, donde se muestra como fue la variación en la intensidad de cada fenómeno, dentro de los años de la muestra con que fue realizado el análisis.

6 RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

6.1 ANÁLISIS DE CRUCES

Con base a la teoría de cruces se realiza el cálculo de las propiedades de cruces: Longitud, intensidad, y suma para excursiones positivas y negativas. Aunque el propósito es identificar la variación de la longitud de excursión por debajo de un umbral correspondiente a una sequía (excursión negativa), también se calcularon las intensidades y sumas de excursiones en las series. Se hace una lectura de estas en orden

cronológico y con un umbral X_0 determinado se definen eventos de LEN , IEN y SEN .

Para cada valor del caudal, se asocia la probabilidad de ser excedido y a esta probabilidad se asocia un valor medio de cada una de las propiedades de cruces analizadas. En la Figura 3 se ilustra la forma en que se leen las propiedades de cruces sobre la curva de duración.

Desde las abscisas se busca el valor de probabilidad deseado, este valor intercepta la curva de duración y la curva del valor medio de la propiedad de cruces, cuyo valor se lee desde sus respectivos ejes.

En la Figura 4 se muestran los resultados de excursiones negativas obtenidos para la estación El Templete. En general, la LEN crece conforme crece el nivel de truncamiento, al igual que en la SEN . La forma de la IEN media en algunos casos se debe a la modulación alrededor de otros valores de truncamiento diferentes de la media

En general, se detectan dos tipos de formas en la LEN media, la primera decreciente para todos los niveles de truncamiento, que es factor común de las estaciones que presentan un régimen bimodal: Arabia, Buenos Aires, Gabino, La Bretaña, La Mosca, La Pintada, La Vieja, Piedras Blancas, Puente Santander, Salvajina, y Templete, ver Figura 5. La segunda es una curva con un mínimo relativo, alrededor del nivel de truncamiento medio (Caudal medio de la estación), que se observa en aquellas estaciones que tienen una distribución monomodal: Chusneque, Puente Fierro, El Caracol y Los Pinos, ver Figura 5. Sin embargo, hay dos estaciones que se apartan del comportamiento de las estaciones con régimen bimodal, las cuales tienen un área de drenaje relativamente pequeña, Arabia y Sucre.

En general, se presenta un decaimiento de la pendiente que tiene estas curvas para los niveles de truncamiento medios, producido por los mínimos relativos de las series de caudal que se tienen en estos niveles.

Se muestran en la Tabla 2 los resultados en las series analizadas de las excursiones negativas para un nivel de truncamiento del 95%.

No hay una relación directa que pueda decir como es la variación de la *LEN* para este nivel de truncamiento, las otras propiedades muestran una relación debido a que son medidas directamente de los valores del caudal.

Varias distribuciones de probabilidad se ajustaron a cada una de las propiedades de cruces para las sequías. La distribución Log-Normal II fue la distribución que más se ajustó a los valores de *LEN* para los percentiles y series analizadas. Las *IEN* se ajustaron más a la distribución teórica Log-Pearson III. Las *SEN* muestran poca tendencia a ajustarse a una misma distribución en cada serie, según la prueba Smirnov-Kolmogorov, sin embargo según la prueba de Cremer Von-Mises, la que más se acepta es la distribución teórica Gamma II.

En general, se tiene que para los niveles de truncamiento asociados a $Q_{80\%}$ las pruebas de ajuste dieron mejores resultados. No se distinguen diferencias en los resultados de ajuste para los diversos ordenes de magnitud de los caudales o áreas de las cuencas. Al menos el 80% de los eventos de *LEN* están por debajo de los 10 días para $Q_{95\%}$, excepto para las estaciones El Caracol y La Virginia las cuales no exceden de los 15 días.

6.2 ANÁLISIS DE LA CONSTRUCCIÓN DE LAS CURVAS DE DURACIÓN DE CAUDALES A PARTIR DE SERIES SEPARADAS EL NIÑO, LA NIÑA Y NORMAL

Al construir las curvas de duración con el mes de inicio del año hidrológico escogido (mes cinco para las estaciones con régimen bimodal y mes seis para las estaciones con régimen monomodal) para las series separadas para la fase cálida, fría y la ausencia del ENSO, se presenta una diferencia considerable con respecto a la curva de duración obtenida de la forma tradicional.

Para todas las estaciones con régimen bimodal se obtiene una curva de duración con valores mayores en las ordenadas con la serie La Niña, una menor con la serie El Niño y una curva intermedia para la serie "Normal", que en la mayoría de las estaciones es muy similar

a la obtenida con la serie completa. La estación La Vieja, siendo bimodal, presenta un comportamiento diferente en la serie Normal, obteniendo la curva de duración con valores mayores en las ordenadas con la serie Normal y no con la serie La Niña. Las estaciones con régimen monomodal presentan un comportamiento similar a las bimodales con respecto a las curvas de duración obtenidas con las series separadas, ver Figura 6.

Los efectos al realizar la curva de duración por medio de las series separadas, tienen mayor importancia en los percentiles altos, debido a que durante fase cálida del ENSO, los caudales bajos son más afectados, presentándose grandes sequías, ver Tabla 3.

Otra forma de visualizar las diferencias entre las curvas de duración obtenidas a partir de muestras separadas de la fase cálida y fría del ENSO, con respecto a las obtenidas con la serie completa, es graficando cada uno de los de los años El Niño o La Niña en forma separada sobre el mismo plano cartesiano, obteniéndose así, unas bandas que muestran la dispersión de estos eventos ver Figura 7.

En las bandas de las series El Niño y La Niña, siempre el extremo superior de la banda de mayores caudales corresponde a la fase fría y el extremo inferior de la banda de menores caudal corresponde a la fase cálida del ENSO. No siempre se presentan dos bandas separadas, debido a que cada fase cálida o fría del ENSO, tiene diferente magnitud, dando cabida a eventos El Niño con caudales no tan pequeños y eventos La Niña con caudales no tan altos, los cuales originan la unión de estas dos bandas.

7 CONCLUSIONES

El estudio de las propiedades de cruces en una estación particular y un nivel de truncamiento determinado (propuesto en un diseño), como son la Longitud, la Intensidad y la Suma de excursión alrededor de un nivel de truncamiento determinado, proporcionan información valiosa que se omite o se pierde con la visión simple de la curva de duración de caudales.

La *LEN*, *IEN* y *SEN* para el análisis de

sequías son variables importantes para la planificación de recursos hidráulicos que tienen en cuenta la persistencia por debajo de un valor dado X_0 , lo que permite cuantificar, en caso de falla, las posibles soluciones y el costo de las pérdidas generadas. Un resultado importante entre las estaciones analizadas, son los valores hasta de 10 días en la longitud promedio de cruces negativos de continuas sequía. Según la corriente y según el aprovechamiento esté puede ser un parámetro a tener en cuenta en análisis de sequías. La *LEN*, *IEN* y *SEN* para las 16 estaciones analizadas se ajustaron mejor a las funciones de distribución teóricas acotadas Log-Normal II, Log-Pearson III y Gamma II respectivamente.

Con la distribución de probabilidad en cada estación, las propiedades de cruces *LEN*, *IEN* y *SEN*, se hallan las probabilidades de ocurrencia de cualquiera de estos eventos de excursión, por ejemplo, la probabilidad de ocurrencia de la *LEN* por encima de una longitud (días) dada. El soporte teórico del análisis permite extrapolación de los resultados ante carencia de datos históricos y provee una flexible definición de sequía, la cual es una rápida y barata forma de evaluación en propósitos de planeamiento y evaluación del riesgo.

Podría brindarse una mejor aproximación a los procedimientos de cruces, buscando un tratamiento con bases físicas y separando las series de acuerdo a los diferentes procesos que actúan sobre la serie (ZCIT, ENSO, etc.) (Poveda, 1998). El conocimiento de parámetros tales como la estructura de correlación podrían brindar un mejor entendimiento acerca de la distribución de las propiedades de cruces, sin embargo, pocas veces se cuenta con ella y su valoración y representatividad son función del número de registros.

Construir las curvas de duración de caudales por medio de muestras separadas es un buen procedimiento para conocer los eventos extremos que se han presentado en la estación en estudio, para según las necesidades del diseño, evitar fallas por sequías extremas (fase cálida del ENSO) o excedencia (fase fría del ENSO). Cuando se tienen estaciones con gran

cantidad de años de registros y se pueden obtener muestras separadas con gran cantidad de eventos El Niño, La Niña y "Normal", se puede pensar en las curvas de duración de caudales de cada una de las muestras separadas, como las curvas que representan el comportamiento promedio durante la ocurrencia de dichos fenómenos y como una buena aproximación de su comportamiento en el futuro.

Aunque el mes de inicio del año hidrológico, ha sido definido para la zona Andina Colombiana como el mes cinco, el análisis de la incidencia de este comienzo, se refleja en la magnitud de las curvas de duración de caudales, debido a que al partir mal la muestra del año afectado por dichos fenómenos, se están despreciando datos que pertenecen a una misma muestra y se están mezclando con datos de otras muestras (afectadas por diferentes fenómenos), lo que produce un cambio en la media de estas series. Es por esto la importancia de corroborar el mes de inicio del año hidrológico y tomar el "año completo" afectado o no, por la fase cálida o fría del ENSO.

Las bandas construidas a partir de cada una de las curvas de duración de caudales realizada con los eventos de la fase cálida o fría del ENSO, para cada año por separado, muestran la variabilidad que han presentado durante el periodo de registro los caudales para todos los percentiles. Si la estación cuenta con gran cantidad de registros, dentro de los cuales se presentan una gran cantidad de eventos cálidos o fríos del ENSO, las bandas construidas a partir de estos eventos, se pueden ver como unas bandas que representan la variabilidad posible de cada uno de estos eventos en el futuro.

El análisis de las series separando por años El Niño, muestra como afecta este fenómeno la curva de duración: En todas las estaciones se tienen diferencias en el caudal para el 95% de tiempo del 10 al 15% con respecto a la serie completa. Estas diferencias pueden ser fundamentales en el diseño, mostrando así, como la ingeniería debe tener cuidado al considerar los parámetros de diseño, específicamente para percentiles considerados de sequía, obtenidos a partir de curvas de duración de caudales con

períodos cortos de registros o períodos largos, pero muestras no homogéneas.

La consideración de los efectos climáticos de gran escala, al evaluar los parámetros de diseño, pueden castigar favorable o desfavorablemente los resultados obtenidos con períodos cortos de registro.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Dr. Peter Waylen (Universidad de la Florida, Florida, Estados Unidos), por su valiosa información y sugerencias, al Dr. Oscar Mesa del Posgrado de Recursos Hidráulicos por sus comentarios y a quienes proporcionaron las series de tiempo para los cálculos.

REFERENCIAS

- Andrade, L. Método de Cálculo para los Gastos Mínimos para el Sur de Ecuador, XV Congreso Latinoamericano de Hidráulica, 285-295, 1996.
- Bras, L. y Rodríguez-Iturbe, I. Random Function and Hydrology, 1985.
- Cramer, H. y Leadbetter, M.R. Stationary and Related Stochastic Processes, Wiley, New York, N.Y., 1967.
- Empresas Públicas de Medellín; Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, Facultad de Minas, Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos. Metodología de proyección hidrológica, informe final, Medellín, 1994.
- Corporación Autónoma Regional del Quindío, Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hídricos, UNALMED. Evaluación de oferta y demanda hídrica para el departamento del Quindío, Octubre 1994.
- Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos, UNALMED. Estudio de oferta y demanda hídrica en la subregión N°1 del departamento del Risaralda, Octubre 1997.
- Foster H. A. Duration Curves, American Society Of Civil Engineers. Paper N° 1885, North Platte, Nebr., 1933a.
- LeBoutiller, D. y Waylen, P. A Stochastic Model of Flow-Duration Curves, Water Resour. Res, 29(10), 3535-3541, 1993b.
- LeBoutiller, D. y Waylen, P. Regional Variations in Flow-Duration Curves for River in British Columbia, Canada, Physical Geography, 14 (4) ,359-378,1993.
- Mejía, J. F. y Montoya M. I. Estudio de Aplicación de Curvas de Duración para Caudales, T.D.G. para optar al título de Ingenieros Civiles, Universidad de Colombia, Facultad de Minas, Departamento de Ingeniería Civil, Medellín, 1999.
- Mesa, O.J., Poveda G. y Carvajal L.F. Introducción al clima de Colombia, Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, Facultad de Minas, 31 - 101, 1997.
- NOAA, National Oceanographic and Atmospheric Administration, 1999.
- Poveda G. Retroalimentación entre el fenómeno de El Niño Oscilación del Sur y la hidrología de Colombia, Tesis de doctorado en ingeniería, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas, Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos, Medellín, 1998.
- Searcy, J. Flow-Duration Curve, Manual of Hydrology: part 2, Low-Flow Techniques, Washington, 1959.
- Sharma, T. C. Stochastic features of drought in Kenya, east Africa, Water Science and Technology Library, Stochastic and Statistical Methods in Hydrology and Environmental Engineering, Vol 1, 1994.
- Vanmarcke, E. Random Fields: Analysis and Syntaxis, Cambridge Massachussets, cap 4, 1986.
- Waylen, P. Statistical analysis of freezing temperatures in central and southern Florida, Journal of Climatology, Vol 8, 1988.
- Woo, M., Wu, K. y Waylen, P. Analysis of duration and deficit of droughts generated by mixed processes, Artículo no publicado, proporcionado por Waylen, P.
- Woo, M. y Tarhule, A. Stramflow droughts of northern Nigerian, Hydrological Sciences, 1994.
- Yevjevich, V., Stochastic Processes in hydrology, Water Resources Publications, Fort Collins, Colorado, USA, 1972.
- Zelenhasic, E. y Salvai, A. A method of stream drought analysis, Water Resources Research 1987.

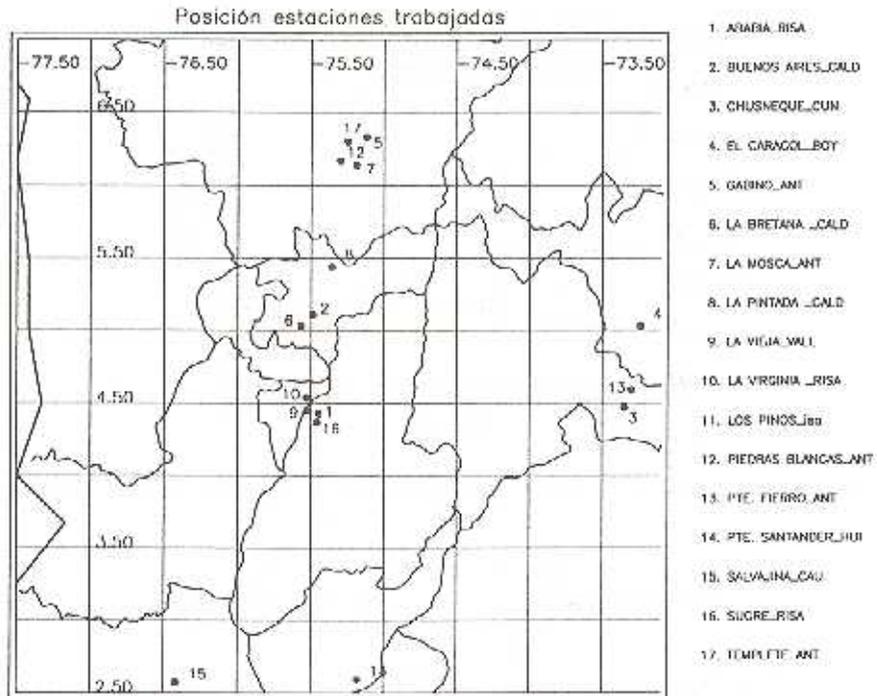


Figura 1 Ubicación de las estaciones.

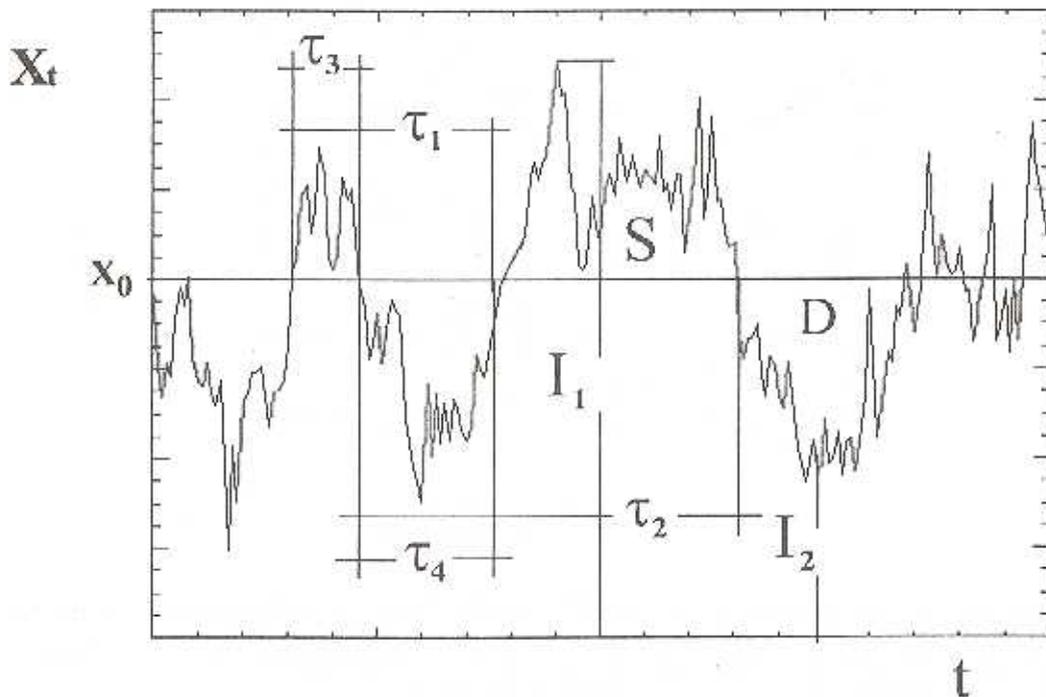


Figura 2 Definición de excursiones en una serie de tiempo.

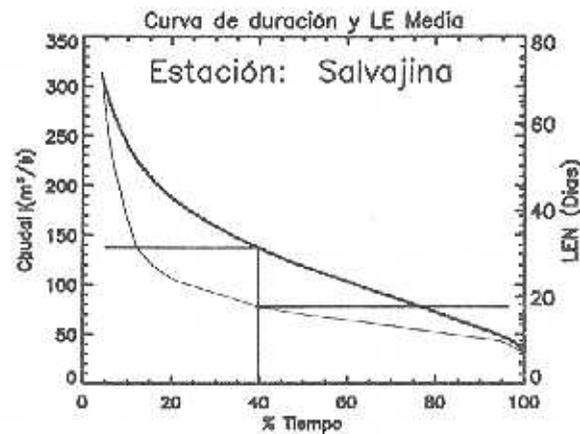


Figura 3 Esquema que ilustra la forma de lectura de los gráficos de la curva de duración y las propiedades de cruces.

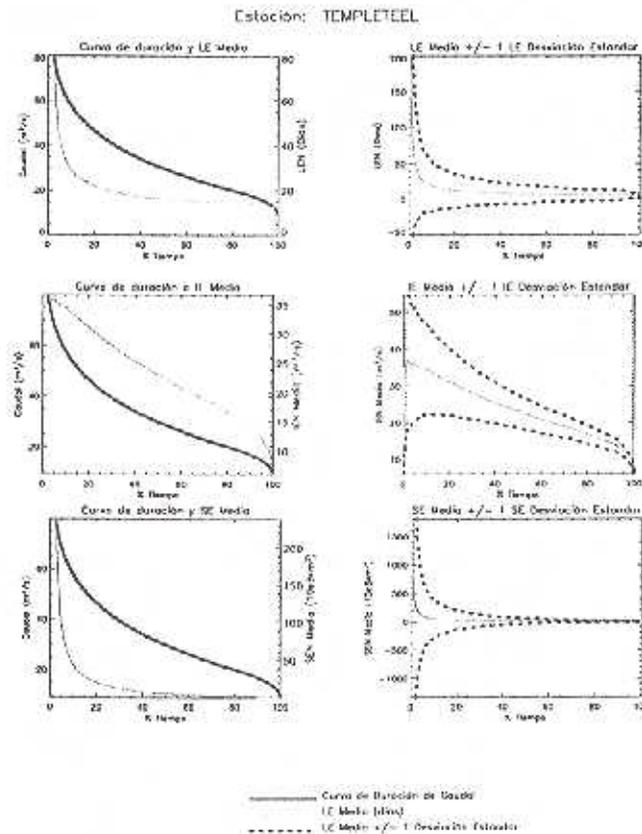


Figura 4. Propiedades de cruces negativas para la estación El Templete, los gráficos del lado izquierdo con-tienen la curva de duración del caudal medio diario y el valor del primer momento de las propieda-des de cruces para cualquier nivel de truncamiento, los gráficos de la derecha contienen los dos primeros momentos de las propiedades de cruces negativas. Por filas, en su orden se tiene las propiedades de cruces de longitud, intensidad y suma.

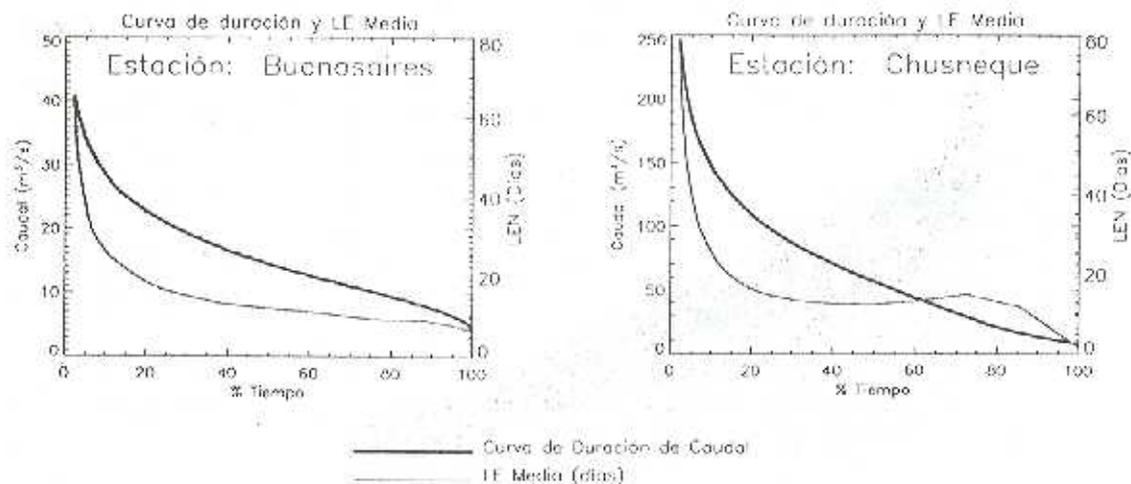


Figura 5 LFN media para la estación Buenos Aires. Distribución Bimodal (izquierda) y monomodal (derecha).

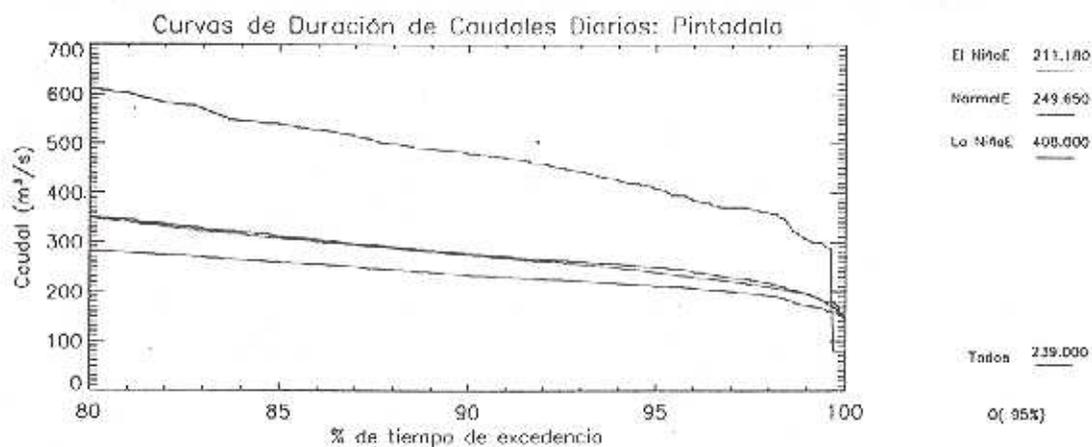


Figura 6. Curvas de duración series separadas El Niño, La Niña y "Normal", Estación La pintada, Mes 5 inicio año hidrológico, Serie bimodal zoom para caudales bajos (percentiles 80 a 100).

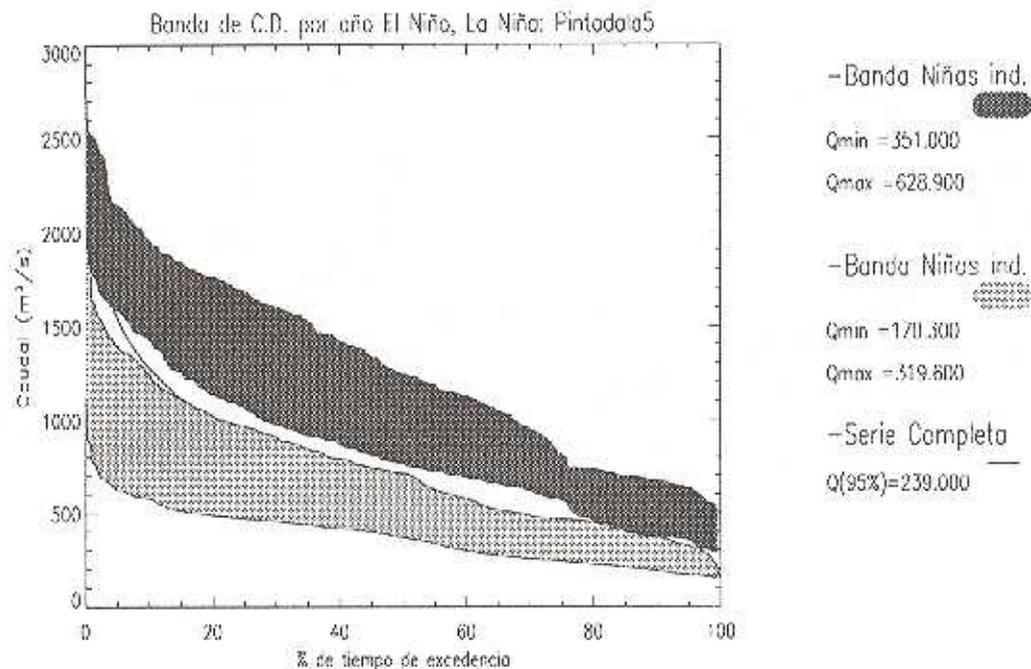


Figura 7. Banda series El Niño y La Niña, estación La Pintada, Mes seis inicio año hidrológico.

Tabla 1. Información básica de las estaciones utilizadas.

Código	Nombre	Dep.	Nombre	Municipio	Latitud	Longitud	Elevación	Area
	Estación		Subcuenca		N(00°00')	W(00°00')	m.s.n.m.	Km ²
2612710	ARABIA	RISA	Barbas	Perelra	0443	7545	1350	76.2*
2614704	BUENOS AIRES	CALD	Risaralda	Ansarma	0511	7549	1140	686.0
3506704	CHUSNEQUE	CUN	Guavio	Ubalá	0447	7335	1620	706.0
3507712	EL CARACOL	BOY	Garagoa	Garagoa	0503	7324	1283	1427.0
2701736	GABINO	ANT	Nechí	Santa Rosa de Osos	0633	7512	1055	2541.0
2614713	LA BRETANA	CALD	Mapa	Viterbo	0503	7557	1080	434.0
2308703	LA MOSCA	ANT	Negro	San Vicente	0614	7519	2060	834.5
2618711	LA PINTADA	CALD	Cauca	Aguadas	0544	7536	560	27452.0
2612704	LA VIEJA	VALL	La vieja	Cartago	0445	7553	914	2736.0
2617703	LA VIRGINIA	RISA	Cauca	La Virginia	0454	7553	900	22814.0
2701709	PIEDRAS BLANCAS	ANT	Medellín	Medellín	0617	7530	2352	24.9
3507708	PTE. FIERRO	ANT	Samundoco	Samundoco	0459	7330	1350	531.0
2109707	PTE. SANTANDER	HUI	Magdalena	Palermo	0259	7518	430	15705.0
2602705	SALVAJINA	CAU	Cauca	Buenos Aires	0257	7642	1070	3348.4'
2612709	SUCRE	RISA	Barbas	Perelra	0443	7546	1162	80.6*
2701703	TEMPLETE	ANT	Granda	Don Matías	0630	7525	2160	1056.0

Tabla 2. Valores de las propiedades de cruces medidas en Q95% en varias estaciones.

Estación	Qmedio	Nº eventos	Q95%	LEN		IEN		SEN	
				Media	D. Est.	Media	D. Est.	Media	D. Est.
PiedrasBlancas	1.13	121	0.56	2.88	2.81	0.46	0.10	0.02	0.00
ArabiLa	2.54	39	0.55	5.95	7.22	0.43	0.10	0.07	0.10
MoscaLa	3.27	133	0.74	4.79	6.33	0.62	0.10	0.05	0.10
Sucre	4.00	60	0.75	4.53	5.18	0.57	0.14	0.08	0.17
BretanaLa	10.86	123	3.06	2.43	4.44	2.64	0.48	0.14	0.53
BuenosAires	16.58	72	6.39	4.54	6.11	5.63	0.59	0.33	0.66
PteFierro	17.88	38	2.00	6.34	7.72	1.63	0.26	0.17	0.24
CaracolEl	25.99	31	2.30	9.06	7.68	1.91	0.28	0.27	0.35
TempleteEl	34.11	124	14.59	5.00	5.52	12.64	1.57	0.87	1.57
Chusneque	71.44	115	10.20	5.30	7.45	7.77	2.12	0.84	1.41
Cartago(LaVir)	81.48	95	22.83	4.60	5.99	20.18	2.66	1.37	3.45
Gabino	90.14	101	43.39	3.95	4.61	38.64	4.78	1.91	3.80
Salvajina	138.04	211	48.00	3.85	4.20	41.76	4.94	2.29	3.82
PteSantander	482.47	144	180.00	4.38	5.75	158.39	20.04	11.44	28.23
VirginiaLa	532.21	50	181.00	9.34	9.22	152.76	23.29	23.27	36.72
PintadaLa	698.91	73	239.00	6.33	7.46	212.82	22.63	16.21	29.48

Tabla 3. Valor del caudal en los percentiles altos y su respectivo diferencia porcentual con respecto a la serie completa de la curva de duración de caudales, series separadas El Niño, La Niña y Normal

Estación	El Niño (m ³ /s)	La Niña (m ³ /s)	Normal (m ³ /s)	Todos (m ³ /s)	Diferencia El Niño (%)	Diferencia La Niña (%)	Diferencia Normal (%)
pte fierro Q(95%)	2.2	2.2	1.9	2	-10.00	-10.00	5.00
pte fierro Q(90%)	2.7	3.09	2.3	2.5	-8.00	-23.60	8.00
pte fierro Q(85%)	3.3	3.89	2.6	3	-10.00	-29.67	13.33
caracol Q(95%)	2.33	2.9	2	2.3	-1.30	-26.09	13.04
caracol Q(90%)	2.9	3.5	2.5	2.9	0.00	-20.69	13.79
caracol Q(85%)	3.7	4.29	3.1	3.6	-2.78	-19.17	13.89
chusneque Q(95%)	9.1	13.1	10.2	10.2	10.78	-28.43	0.00
chusneque Q(90%)	11.9	16.2	12.61	13.1	9.16	-23.66	3.74
chusneque Q(85%)	14.71	19.76	16.1	16.34	9.98	-20.93	1.47
la mosca Q(95%)	0.63	1.6	0.74	0.74	14.86	-116.22	0.00
la mosca Q(90%)	0.84	1.88	0.92	1.03	18.45	-82.52	10.68
la mosca Q(85%)	1.12	2.1	1.14	1.22	8.20	-72.13	6.56
la pintada Q(95%)	211.18	408	249.65	239	11.64	-70.71	-4.46
la pintada Q(90%)	234	480.1	278	274	14.60	-75.22	-1.46
la pintada Q(85%)	259.35	538.65	311	307	15.52	-75.46	-1.30
la vieja Q(95%)	20.54	20.62	26.02	22.83	10.03	9.68	-13.97
la vieja Q(90%)	23.47	24.45	31.5	26.8	12.43	8.77	-17.54
la vieja Q(85%)	25.86	29.9	35.98	30.3	14.65	1.32	-18.75
la virginia Q(95%)	152	293.55	196.33	181	16.02	-62.18	-8.47
la virginia Q(90%)	176	366.1	229	217	18.89	-68.71	-5.53
la virginia Q(85%)	198.7	410	254	244	18.57	-68.03	-4.10
gabino Q(95%)	40.09	59.47	41.89	43.39	7.61	-37.06	-3.46
gabino Q(90%)	44.59	65.54	48.69	48.09	7.28	-36.29	-1.25
gabino Q(85%)	47.95	69.09	52.86	51.93	7.66	-33.04	-1.79
pte santander Q(95%)	159	215	194	180	11.67	-19.44	-7.78
pte santander Q(90%)	190	270	230	221	14.03	-22.17	-4.07
pte santander Q(85%)	215	307.78	254	247	12.96	-24.61	-2.83
salvajina Q(95%)	45	65	49	48	6.25	-35.42	-2.08
salvajina Q(90%)	51	79	57	57	10.53	-38.60	0.00
salvajina Q(85%)	56	89	66	64	12.50	-39.06	-3.13
templete Q(95%)	12.99	19.69	14.99	14.59	10.97	-34.96	-2.74
templete Q(90%)	14.79	21.69	17.09	16.89	12.43	-28.42	-1.18
templete Q(85%)	16.32	23.55	18.69	18.59	12.21	-26.68	-0.54