



Universidad de Cuenca



UNIVERSIDAD DE CUENCA
desde 1867

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

“Análisis de las crecidas presentadas en los ríos Tarqui, Yanuncay
y Tomebamba desde 1997 hasta 2011”

Tesis previa a la obtención del
título de Ingeniera Civil

AUTORA: Elizabeth Carolina Vallejo Llerena.

DIRECTOR: Ing. Rolando Enrique Céleri Alvear PhD.

Mayo de 2014



RESUMEN

La ciudad de Cuenca está atravesada por 4 ríos que presentan ocasionales desbordamientos producto de fuertes precipitaciones, especialmente durante la época lluviosa, los cuales han provocado pérdidas humanas y materiales. Para enfrentar estos riesgos climáticos hacen falta estudios que describan el comportamiento de los caudales y que permitan llevar adelante una adecuada gestión de riesgos, aplicando estos conocimientos como un enfoque no estructural para la mitigación de desastres.

En el presente estudio se describen las condiciones hidrometeorológicas, de caudal y precipitación, que indujeron las crecidas en los ríos Tomebamba, Tarqui y Yanuncay entre los años 1997 y 2011. En primer lugar se analiza la pertinencia de las estaciones pluviométricas y de descarga para describir la configuración de las crecidas, al tiempo que se evalúa si las más fuertes fueron provocadas por precipitaciones extraordinarias. A continuación se establecen los volúmenes acumulados de precipitación que han desencadenado crecidas, así como el tiempo (en días) que tardaron en acumularse; estableciendo además los caudales sobre los cuales se inician situaciones de riesgo. Finalmente, se estudian conjuntamente los valores de precipitación y caudal para determinar el comportamiento de estos dos parámetros previo a la ocurrencia de una crecida.

Ha sido posible entonces, proponer valores de caudal que implican riesgo, volúmenes de precipitación acumulados en un determinado número de días que pueden provocar crecidas, y pendientes de referencia de la relación *Caudal promedio acumulado vs Volumen de Precipitación acumulada*; información que con un monitoreo adecuado posibilita la alerta temprana de inundaciones en estos 3 ríos.

Palabras clave: Tomebamba, Tarqui, Yanuncay, sistema de alerta, inundación.



ABSTRACT

The city of Cuenca is crossed by four rivers that occasionally overflow as consequence of heavy rainfall, especially during the rainy season, causing human and material losses. In order to face these climate risks, studies that describe the behavior of the flow are required, allowing carrying out a proper risk management and applying this knowledge as a non-structural approach to disaster mitigation.

The present study describes the hydrometeorological conditions of flow and precipitation that induced floods in Tomebamba, Yanuncay and Tarqui rivers, between 1997 and 2011. Firstly, the relevance of the rainfall and discharge stations to describe the configuration of floods is analyzed, while evaluating whether the strongest floods were caused by extraordinary rainfall. Then the accumulated volume of rainfall that triggered floods is determined, as well as the time (in days) it took to accumulate; it is also established the discharge above which risk situations start. Finally, the values of precipitation and flow, together studied, are used to determine the behavior of these two parameters prior the occurrence of flooding.

It has then been possible to propose flow values that involve risk; rainfall volumes accumulated a certain number of days that can cause floods, and reference slopes for the *cumulative average flow vs. cumulative rainfall* relationship; information that with adequate monitoring enables early warning of floods in these 3 rivers.

Keywords: Tomebamba, Tarqui, Yanuncay, warning system, flood.



ÍNDICE

RESUMEN.....	2
ABSTRACT	3
ÍNDICE	4
1. Introducción.....	8
1.1. Importancia del Estudio	8
1.2. Justificación	11
2. Marco teórico	14
3. Materiales y métodos	19
3.1. Descripción de las cuencas	19
3.2. Datos.....	20
3.2.1. Origen de los datos.....	20
3.2.2. Descripción de las series de tiempo	21
3.3. Selección de estaciones y período de análisis	22
3.3.1. Río Tomebamba	22
3.3.2. Río Tarqui.....	23
3.3.3. Río Yanuncay	25
3.4. Descripción de los métodos a utilizarse	26
3.4.1. Definición de umbrales.....	27
3.4.2. Condiciones antecedentes a la crecida.....	27
3.4.3. Precipitación	28
3.4.4. Precipitación y Caudal combinados.....	29
3.4.3. Relación del caudal pico de la crecida con respecto al caudal con el que inició el ascenso de la misma.	31
4. Resultados y Discusión.....	32
4.1. Definición de umbrales	32
4.2. Condiciones antecedentes a la crecida	34



4.2.1. Resultados para la cuenca del río Tomebamba	35
4.2.2. Resultados para la cuenca del río Tarqui.....	38
4.2.3. Resultados para la cuenca del río Yanuncay	40
4.3. Precipitación.....	44
4.4. Caudal	49
4.4.1. Matadero Sayausí:	49
4.4.2. Tarqui Cumbe	52
4.4.3. Yanuncay en Pucán:	56
4.5. Precipitación y Caudal	58
4.5.1. Matadero Sayausí:	58
4.5.2. Tarqui Cumbe	60
4.5.3. Yanuncay en Pucán.....	62
4.6. Relación del caudal pico de la crecida con respecto al caudal con el que inició el ascenso de la misma.....	65
5. Conclusiones	67
BIBLIOGRAFÍA.....	70



Universidad de Cuenca



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

Yo, Elizabeth Carolina Vallejo Llerena, autora de la tesis "Análisis de las crecidas presentadas en los ríos Tarqui, Yanuncay y Tomebamba desde 1997 hasta 2011", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autora.

Cuenca, 09 de Mayo de 2014.

Elizabeth Carolina Vallejo Llerena
CI: 0603385360

Cuenca Patrimonio Cultural de la Humanidad. Resolución de la UNESCO del 1 de diciembre de 1999

Av. 12 de Abril, Ciudadela Universitaria, Teléfono: 405 1000, Ext.: 1311, 1312, 1316

e-mail cdjbv@ucuenca.edu.ec casilla No. 1103

Cuenca - Ecuador



Universidad de Cuenca



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

Yo, Elizabeth Carolina Vallejo Llerena, autora de la tesis "Análisis de las crecidas presentadas en los ríos Tarquí, Yanuncay y Tomebamba desde 1997 hasta 2011", reconozco y acepto el derecho de la Universidad de Cuenca, en base al Art. 5 literal c) de su Reglamento de Propiedad Intelectual, de publicar este trabajo por cualquier medio conocido o por conocer, al ser éste requisito para la obtención de mi título de Ingeniera Civil. El uso que la Universidad de Cuenca hiciera de este trabajo, no implicará afección alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autora.

Cuenca, 09 de Mayo de 2014.

Elizabeth Carolina Vallejo Llerena
CI: 0603385360

Cuenca Patrimonio Cultural de la Humanidad. Resolución de la UNESCO del 1 de diciembre de 1999

Av. 12 de Abril, Ciudadela Universitaria, Teléfono: 405 1000, Ext.: 1311, 1312, 1316

e-mail cdjbv@ucuenca.edu.ec casilla No. 1103

Cuenca - Ecuador



1. Introducción

1.1. Importancia del Estudio

Las crecidas son elevaciones rápidas en el nivel de las aguas de un curso fluvial, hasta un máximo a partir del cual dicho nivel desciende a una velocidad menor (SECF 2005, pp. 286). La ocurrencia de estos fenómenos obedece a la transferencia de agua y energía entre la superficie terrestre y la atmósfera, determinada por factores hidrometeorológicos como el viento, lluvia, temperatura, humedad del suelo, entre otros. Diversos estudios sobre crecidas e inundaciones han relacionado dichas descargas con la intensidad y duración de las precipitaciones (Norbiato, 2007; Schaeffli, 2007; Koutroulis, 2010; He, 2012; Liu 2013), temperatura (Schaeffli, 2007; Koutroulis, 2010; Liu, 2013), extensión espacial (Zhang, 2001; Koutroulis, 2010; He, 2012), estacionalidad de las crecidas (Koutroulis, 2010); hasta estudios mucho más complejos que consideran la época del año, velocidad y dirección de las tormentas, vulnerabilidad del ecosistema, balance de agua, tiempo de respuesta, conductividad hidráulica saturada, entre otros.

Los frecuentes desbordamientos de los ríos que atraviesan la ciudad de Cuenca han afectado las zonas inundables de la urbe y zonas aledañas. En los últimos años, la información registrada por la prensa local da cuenta de graves consecuencias debidas a estos eventos:

- Marzo de 1993: El cerro Tamuga, debido a la humedad del invierno entre otras causas, tapona el curso de las aguas del río Paute en la garganta que forma en el sector de la Josefina, produciendo su embalse y posterior desbordamiento.
- Octubre 1999: el río Tarqui salió de su cauce e inundó una gran parte del sector de Guzho Bajo, los habitantes estuvieron a punto de evacuar sus



casas y lugares de trabajo, en horas de la madrugada, por la fuerte y temerosa crecida del río. La cancha de fútbol y varias extensiones de sembríos quedaron bajo las aguas.

- Marzo 2005: Creciente del río Yanuncay deja tres barrios aislados, dos familias evacuadas y daños en cultivos y animales de pastoreo; la creciento arrasó con puentes de madera en las comunidades de Soldados, Bayán y Chugchugud. El sector más afectado fue la comunidad Inmaculada de Barabón, de la parroquia San Joaquín, al suroccidente del cantón Cuenca.
- Abril de 2006: se desbordan los ríos Cumbe e Irquis, el río Tarqui anega zonas lecheras del sector destruyendo viviendas y enceres.
- Junio de 2007: el río Yanuncay, en el tramo entre las avenidas 1 de Mayo, Loja y Fray Vicente Solano, sobrepasó su cauce y llegó hasta la calzada; debido a este desbordamiento se construyeron muros en los márgenes de los ríos una vez detectados los puntos donde existe más peligro. El 19 de ese mes una persona muere arrastrada por las aguas del río Tarqui y un puente se derrumba sobre el río Yanuncay después de 2 días de constante lluvia.
- Febrero de 2008: Se desborda el río Tarqui en la zona de Victoria del Portete.
- Marzo de 2012. Una tormenta de aproximadamente una hora inunda la avenida de las Américas, las lluvias intensas, y el desbordamiento de los ríos Tarqui y Yanuncay, afectan a varios sectores: El Salado (el embaulado de la quebrada colapsa e inunda más de 20 viviendas, vehículos bajo el agua, 40 personas rescatadas, 90 evacuadas, pérdida de enseres y animales de crianza), Huizhil (muere una persona aplastada por su casa, 2 personas heridas), Victoria de Portete (500 hectáreas de pasto, animales muertos), entre otros. Se presentan deslizamientos en la Panamericana Norte, avenida de Las Américas, avenida González Suárez, Ricaurte, en la vía Déleg, y en Paccha. La vía



Gualaceo – Limón se cierra al tránsito vehicular. La autopista Cuenca-Azogues se cierra para limpieza.

- Abril de 2012. El desbordamiento de los ríos Cuenca, Burgay y Paute afecta las zonas de El Descanso y La Josefina. Las operaciones de la subestación eléctrica El Descanso (Elecaastro) debieron ser suspendidas, se presentaron inundaciones de casas y sembríos.
- Junio de 2012. El río Tomebamba se desborda por las intensas lluvias, inundando el sector del coliseo Jefferson Pérez, tramos frente a la Universidad de Cuenca, puente Centenario, Hospital regional Vicente Corral Moscoso, Puertas del Sol y Río Amarillo.
- Marzo de 2013. En los sectores de Sayausí, San Joaquín y Río Amarillo se inundan 15 inmuebles, de los cuales el agua debe ser evacuada a través de bombas. La mayoría de emergencias se presentan en zonas donde está prohibida la construcción.¹

Frente a esta problemática el gobierno nacional y local debe adoptar estrategias para enfrentar los riesgos climáticos, sin embargo, esta tarea se dificulta a causa de la falta de estudios que describan el comportamiento de los ríos a fin de tomar decisiones basadas en información confiable. Una consultoría contratada por el Municipio de Cuenca determinó caudales de desborde y zonas de riesgo para los ríos Tomebamba (160 m³/s), Yanuncay (160 m³/s) y

¹ Para detalles de esta información, referirse a los siguientes enlaces: <http://www.hoy.com.ec/noticias-ecuador/cuenca-teme-desbordamiento-de-rios-269769.html>,
<http://m.extra.ec/ediciones/2011/05/31/especial/cuatro-rios-de-cuenca-a-punto-de-desbordarse/>,
<http://www.eldiario.ec/noticias-manabi-ecuador/41597-al-menos-un-muerto-y-un-puente-caido-en-cuenca/>,
<http://www.elmercurio.com.ec/230708-invierno-empieza-generar-estragos/#.UqjRIPTuKz4>,
http://www.elmercurio.com.ec/323748-recrudece-el-invierno-y-aumentan-danos/#.UqJR4_TuKz4,
<http://www.eltiempo.com.ec/noticias-cuenca/93711-graves-inundaciones-en-cuenca-dejan-al-menos-un-muerto/>,
<http://www.eluniverso.com/2012/06/25/1/1447/sectores-cuenca-inundados-desbordamiento-rio-tomebamba.html>,
http://www.elcomercio.com.ec/pais/bomberos-atendieron-inundacion-Cuenca-invierno_0_884311673.html,
<http://www.elmercurio.com.ec/330288-subestacion-electrica-suspendio-operaciones-por-inundacion/#.UqJSZvTuKz4>
http://www.ecuadorinmediato.com/index.php?module=Noticias&func=news_user_view&id=71813&u=el_tiempo_cuenca_creciente_rios_amenaza_a_cuenca
<http://www.eluniverso.com/2005/03/11/0001/12/CC6D4E3E1E174FD4BE109FC1F8FFC0A3.html>



Tarqui ($90 \text{ m}^3/\text{s}$)², sin embargo, el corto lapso de tiempo en que se incrementan los caudales ha impedido tomar las medidas adecuadas para el manejo de este tipo de riesgos, por lo que resulta necesario estudiar la manera en que se producen estos incrementos en relación con la precipitación registrada.

1.2. Justificación

De acuerdo al *Plan Nacional del Buen Vivir 2013-2017* (Senplades, 2013), en las últimas dos décadas los desastres a nivel mundial se duplicaron y alcanzaron más de 400 por año. Tan solo en 1998 (año en el que el Fenómeno del Niño en nuestro país significó la destrucción de más del 14% de PIB del Ecuador) los daños ocasionados por desastres de origen climático excedieron el costo total de todos los desastres ocurridos durante los años 80 (Vargas, 2002).

En el informe *Desastres y desarrollo: el impacto en 2010*, CEPAL determinó que en Centroamérica, el Caribe y la Región Andina (en especial Ecuador y Bolivia) el impacto directo de tormentas tropicales y las consecuencias indirectas representan inundaciones, deslizamientos de tierra y sequías que sumaron en ese año no menos de 10 millones de personas con daños y pérdidas no menores a los 10 millones de dólares. El Ecuador, debido a sus condiciones geográficas, sociales y económicas, presenta gran vulnerabilidad ante fenómenos de origen natural, que se evidenció durante 1900 y 2009 años en que se registraron 65 desastres de gran magnitud: el 60%, provocado por fenómenos hidrometeorológicos (sequías, inundaciones, deslizamientos húmedos) y el 40%, por eventos geofísicos (sismos, erupciones volcánicas y deslizamientos secos) (Senplades, 2013).

No resulta un hecho fortuito que los efectos más graves de los desastres naturales se lo sientan en los países de América Latina (y en general en países

² Esta información fue obtenida de los siguientes enlaces: http://www.elcomercio.com.ec/pais/zonas-capital-azuaya-vulnerables-crecidas_0_516548433.html, <http://www.eluniverso.com/2011/07/12/1/1447/alerta-creciente-rios-varias-zonas-cuenca.html>



en desarrollo) y dentro de éstos en zonas de asentamientos ilegales, áreas inundables y de alto riesgo, en dónde las prácticas ambientales y urbanísticas exacerbaban el problema. El Estado ecuatoriano ha considerado que la alta probabilidad de ocurrencia de desastres, principalmente debido a las condiciones hidrometeorológicas locales y regionales, constituye la principal razón para orientar la gestión pública a la reducción de las vulnerabilidades (Senplades, 2013), las cuales están asociadas, por definición, a la exposición ante las amenazas de origen antrópico o natural y a la capacidad que las sociedades y personas desarrollan para protegerse de ellas. Dado que la ocurrencia de fenómenos naturales que causen desastres no puede evitarse, resulta necesario dirigir los esfuerzos hacia la prevención a través de un adecuado conocimiento de los mismos; en este sentido, los recursos que se utilizarían en la reparación de daños una vez que el desastre ha ocurrido, deben ser encaminados a la adopción de estrategias (entre otras la generación de información para la toma de decisiones) que permitan ahorrar dinero y sobre todo, salvar vidas. Una de las grandes falencias de nuestros países ha sido la falta de producción científica que aporte a la descripción y resolución de las problemáticas locales, por lo que se evidencia que cualquier esfuerzo para alcanzar el bienestar o Buen Vivir para todas y todos requiere del desarrollo de una cultura de investigación científica.

De acuerdo a la Secretaría Nacional de Gestión de Riesgos (SNGR) la vulnerabilidad urbana en Ecuador ha aumentado debido a los elevados índices de urbanización, incluyendo asentamientos no planificados e inseguros en áreas inundables y montañosas. En una ciudad como Cuenca, atravesada por 4 ríos, un estudio que describa el comportamiento de éstos frente a las precipitaciones registradas, resulta indispensable para los procesos de planificación urbanística y ordenamiento territorial que consideren la gestión integral, preventiva y sustentable de riesgos, a la vez que serviría como referencia para la realización de posteriores estudios del mismo tipo en el resto de ciudades ribereñas del país; cabe indicar que esta clase de estudios son



escasos o inexistentes. Esta información aportaría a los objetivos del Ecuador, que para el 2030, se ha planteado gestionar eficientemente las condiciones creadas por el cambio climático contando con mecanismos de seguimiento de sus tendencias regionales y sus efectos en dimensiones claves de la gestión del territorio, como sus balances hídricos, niveles de riesgo, etc. Es política estatal el coordinar y articular el sistema nacional descentralizado de gestión de riesgos, mejorando las capacidades institucionales y sociales, la producción de conocimiento y el intercambio de información científico-técnica (Senplades, 2013).

En esta investigación se analizan los datos de precipitación y caudal recogidos por la Empresa Municipal de Telecomunicaciones, Agua Potable y Alcantarillado (ETAPA) para identificar las condiciones hidrometeorológicas que propician la generación de caudales altos en los ríos Tomebamba, Yanuncay y Tarqui, con el objetivo de aportar al mejoramiento de los sistemas de control y alerta temprana, monitoreo y atención oportuna a la población del cantón Cuenca, ante los riesgos de crecidas y desbordamientos a los que está expuesta.



2. Marco teórico

El conocimiento de los patrones climáticos asociados a eventos extremos de precipitación y escorrentía puede servir como un sistema de alerta temprana de inundaciones y, de acuerdo a Koutroulis (2010), constituiría un enfoque no estructural para la mitigación de inundaciones. Para describir estos fenómenos, diversos estudios han investigado la estacionalidad de la ocurrencia de inundaciones (período de retorno), la extensión espacial (áreas de riesgo), las relaciones lluvia – escorrentía, temperatura, capacidad de almacenaje de la captación, entre otros, como se detallan a continuación.

Estacionalidad

Diferentes acercamientos analizan la estacionalidad de las crecidas. Parajka (2009) introdujo el índice S_{max} que describe la estacionalidad de las características medias mensuales de precipitación y escorrentía a largo plazo; este método estima la frecuencia con la que el máximo promedio mensual de un año dado ocurre en el mismo mes del máximo promedio mensual de una serie de tiempo. Céleri et al (2009), por otro lado, utiliza un índice de estacionalidad que mide la propagación de la lluvia mensual respecto de una distribución mensual uniforme ideal, mientras que Koutroulis (2010) lo hace en términos de estadísticos direccionales transformando la fecha juliana del evento hidrológico.

En otro enfoque, Schaepli (2007) afirma que los fenómenos hidrológicos extremos son a menudo provocados por co - variaciones excepcionales de los procesos hidrometeorológicos de entrada, y en particular por co - oscilaciones excepcionales en diferentes escalas temporales, por lo que aplica el análisis espectral wavelet y cross wavelet como métodos para detectar las mencionadas



co – oscilaciones excepcionales; a través de este análisis el autor investiga cuándo y en qué escalas temporales las mediciones de precipitación, temperatura y escorrentía co - oscilan, es decir la frecuencia en que se producen estos eventos extremos.

Las diferencias sistemáticas en las magnitudes de los picos de inundación se relacionan con la estructura de la red, escala espacial de las tormentas, contrastes en la atenuación de las olas de inundación (canal o valle) (Zhang, 2001). Por esta razón, para estudiar la estacionalidad de una tormenta Norbiato (2007) analiza la precipitación máxima anual de corta duración agregando la información proveniente de varias muestras en una sola gran muestra, con lo cual investiga las características de frecuencia de una tormenta para varias duraciones de lluvia. Esta metodología es en la actualidad *“la que mejor se adapta a las condiciones de América Latina... de gran variabilidad interanual de las precipitaciones, una red muy poco densa de estaciones meteorológicas, y con una gran proporción de registros cortos”* (Núñez et al, 2011). Esta metodología sin embargo no puede ser aplicada en el presente estudio al no contarse con estaciones de medición distribuidas geográficamente sobre las que se pueda asumir que todas las muestras provienen de un mismo modelo de probabilidad (distribución de frecuencias idéntica, excepto por un factor de escala específico para el sitio).

Precipitación

El análisis del papel de las precipitaciones en el desencadenamiento de una inundación puede abordarse desde enfoques Lagrangianos o Eulerianos. El análisis Lagrangiano describe el comportamiento de una partícula fluida cuya posición es una función del tiempo. Este tipo de metodologías ha sido empleado en estudios como el de Zhang (2001) quien realiza un seguimiento de la tormenta analizando su velocidad, dirección y tamaño; y Norbiato (2007) quien caracteriza la severidad de una tormenta de cantidades extraordinarias de lluvia



y gran variabilidad espacial.

Por otro lado, en el enfoque Euleriano se selecciona un punto específico en el que se describe el movimiento de la partícula que lo ocupa en los diferentes instantes, analizando parámetros como precipitación máxima, drenaje de cuenca, proporción de lluvia promedio en la cuenca para un tiempo t , cobertura de lluvia fuerte, etc. Este enfoque es el mayormente utilizado con modelos como el propuesto por He (2012) que simula la relación entre la lluvia y escorrentía basándose en la solución de la ecuación de energía unidimensional derivada de la ecuación de Bernoulli para flujo constante gradualmente variado.

Zhang (2001) analiza la variabilidad espacio temporal de la lluvia a través de una combinación de ambos enfoques.

En el presente estudio se cuenta con datos de no más de dos estaciones de precipitación y caudal para cada río, por lo que el enfoque utilizado será ineludiblemente Euleriano.

Temperatura

Los estudios de crecidas en ecosistemas de montaña toman a la temperatura como factor determinante puesto que tendrían influencia en el derretimiento de glaciares y el desencadenamiento de inundaciones. Liu (2013) describió un vínculo entre el clima y los flujos de escombros en el monte Nyenchen Tanglha en China como función de la lluvia diaria y la temperatura máxima, obteniendo expresiones para estos dos parámetros por medio de ecuaciones de regresión lineal. En captaciones alpinas como las estudiadas por Schaefli (2007) con altitudes de alrededor de 650-4500 msnm, altura media de 2600 msnm, se indica que *“la ocurrencia de inundaciones está fuertemente influenciada por la acción conjunta de la lluvia y la temperatura”*. En estas dos zonas de estudio, de clima templado y con marcados cambios de temperatura de acuerdo a la estación del año, se producen los efectos antes descritos; mientras que en la zona ecuatorial, en la que se presentan únicamente dos estaciones (seca y



lluviosa), y especialmente en cuencas desprovistas de glaciares, la temperatura casi no presenta variación, sobre todo al compararla con los importantes cambios que se evidencian en el régimen de lluvias.

Infiltración

La capacidad de almacenamiento disponible en el suelo antes que empiece un evento de lluvia trae como resultado que precipitaciones similares puedan ocasionar situaciones de descarga completamente diferentes. Si el suelo está casi saturado, un evento de lluvia provocará descargas mucho mayores que en situaciones en las que el potencial de almacenamiento es alto. Por esto, análisis de observaciones de lluvia como el elaborado por Zhang (2001) considera parámetros como la conductividad hidráulica saturada, contenido inicial de humedad, entre otros, con los cuales aplica el modelo de infiltración de Green-Ampt. Otra metodología utilizada para el cálculo de la infiltración emplea los números de curva SCS (Segovia, 2009; He, 2012), que es un método empírico desarrollado por el Soil Conservation Service (SCS) para el cálculo de la transformación de lluvia-escorrentía, que surgió de la observación del fenómeno hidrológico en distintos tipos de suelo en varios estados y para distintas condiciones de humedad antecedente.

Con estos antecedentes se concluye que el análisis de las condiciones hidrometeorológicas, combinado con el conocimiento previo de los mecanismos físicos relevantes (magnitudes de infiltración, propiedades hidráulicas del suelo, influencia de actividades antropogénicas), puede contribuir a la modelización de los procesos hidrológicos, cuya comprensión es necesaria para la reducción de riesgos de inundación.

Por ello, la gestión del riesgo de inundaciones requiere el conocimiento de los peligros y vulnerabilidades de un área, que permitan la orientación de la toma de decisiones sobre la materia. Para evaluar el peligro hidrológico, He (2012) ha



diseñado un índice de peligro de lluvia que integra variables como la profundidad de lluvia, duración de la tormenta, lluvia máxima anual y un parámetro adimensional que valora la vulnerabilidad de un ecosistema de ser perturbado. Adicionalmente, propone un índice de peligro de inundación, en el que considera la descarga de inundación (m^3/s), duración del evento de lluvia y áreas inundadas. En la Estrategia Nacional de Cambio Climático, la gestión de riesgos, fundamentada en el establecimiento de este tipo de índices, es un eje transversal para mejorar las prácticas de preparación, respuesta y recuperación, en búsqueda de mejorar la calidad de vida la población (Senplades, 2013).

En casi la totalidad de estudios a los que se hace referencia en esta sección, los investigadores se centraron en cuencas bien instrumentadas (alta densidad de sensores que puedan capturar la variabilidad de los procesos hidrometeorológicos, sistemas de clasificación de la circulación atmosférica desarrollados para Europa, etc.), con amplios registros de datos (algunos superiores a los 50 años), que registran distintos parámetros (precipitación, descarga, temperatura, humedad, infiltración del suelo, velocidad y dirección del viento, etc.). Esta situación no es común en la región Andina, instrumentada en el mejor de los casos, de estaciones pluviométricas e hidrológicas automáticas, lo cual implica que la aplicación de los índices descritos en esta sección se vea limitada por la falta de datos y las fallas en el registro de los mismos.

Por lo expuesto, el presente estudio tiene por objetivo establecer las posibles condiciones de precipitación y caudal desencadenantes de una crecida en la ciudad de Cuenca, para lo cual se dispone de datos para 3 de los 4 ríos que la atraviesan, en el periodo comprendido entre 1997 y 2011.



3. Materiales y métodos

3.1. Descripción de las cuencas

Los ríos sobre los que versa el presente estudio son: Tomebamba, Tarqui y Yanuncay, cuyas cuencas se caracterizan en la siguiente tabla:

Tabla 1: Características de las cuencas de estudio. Ríos Tomebamba, Tarqui y Yanuncay.

	Río Tomebamba	Río Tarqui	Río Yanuncay
Área de la cuenca (km²)	338,32	476,92	413,90
Caudal pico más alto registrado (m³/s)	154,68	80,304	197,74
Caudal promedio de la serie (m³/s)	11,88	3,21	7,75
Pendiente promedio	4,2%	2,2%	2,5%
Elevación a la salida de la cuenca (msnm)	2480	2520	2560
Elevación del punto más alto de la cuenca (msnm)	4400	3920	4280



Cobertura vegetal	Bosque nativo, eucaliptos, páramo, pasto, bosque de polylepis, cultivos. Al salir del Parque Nacional El Cajas, el río recorre zonas ganaderas, asentamientos humanos dispersos y áreas destinadas al turismo y a la actividad piscícola.	El uso de suelo en la zona es eminentemente agrícola y ganadero, existen numerosas haciendas lecheras, con grandes extensiones de potreros para el mantenimiento del ganado vacuno	El bosque nativo ha desaparecido de la mayor parte de la cuenca, laderas cubiertas de pastos. Superficies cubiertas de chaparros, frecuentemente quemados para incrementar las zonas de pasto para el ganado. Poblados dispersos en la parte alta y media de la cuenca con incipiente actividad turística y piscícola.
--------------------------	---	--	--

3.2. Datos

3.2.1. Origen de los datos

En la provincia del Azuay, 2 entidades han instalado, operan y mantienen redes de Estaciones Hidrometeorológicas: INAMHI (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología) desde los años sesenta y, recientemente ETAPA (Empresa de Telecomunicaciones, Agua Potable y Alcantarillado de Cuenca) desde finales de los años noventa. En sus respectivas estaciones, el INAMHI recolecta datos dos veces cada día pues son estaciones convencionales manuales, mientras que ETAPA tiene estaciones automáticas que registran cada 5 minutos. Para este estudio se han utilizado los datos proporcionados por ETAPA puesto que las crecidas de los ríos en estudio se producen en pocas horas, lo cual no podría ser percibido con un registro diario.



ETAPA posee 15 estaciones de lluvia y 12 de caudal ubicadas sobre las cuencas de los ríos Tomebamba, Yanuncay, Tarqui y Machángara, las cuales debido a su corto período de registro de datos (a partir de 1997) no proporcionan información suficiente que permita concluir tendencias o cambio climático.

3.2.2. Descripción de las series de tiempo

Se han tomado los datos correspondientes a los ríos que atraviesan la ciudad de Cuenca: Tarqui, Yanuncay y Tomebamba, descartándose el río Machángara debido a la presencia de 2 presas y 3 centrales hidroeléctricas (Saucay I, Saucay II y Saymirín) que regulan el caudal. Para cada uno de estos ríos, en primera instancia, se analizó la estación de caudal ubicada a la salida de la cuenca y las estaciones de precipitación ubicadas en la parte alta de la cuenca. Posteriormente, luego del análisis de los datos se seleccionaron las estaciones que formarían parte del estudio.

Los datos de caudal en general presentan muchas irregularidades en los intervalos de registro, los cuales varían desde 5 minutos hasta algunas horas, existiendo incluso días enteros en los que no se registra ningún dato. Por este motivo, sumado a la escasez de estaciones de medición de caudal en cada uno de los ríos, no fue posible aplicar alguna de las metodologías propuestas por varios investigadores para completar los datos faltantes [Céleri 2007, Espinoza 2009, Lavado 2012]. Se han promediado los caudales para hacerlos diarios, y de esta manera establecer el porcentaje de registros faltantes así como su distribución, es decir si hay una baja densidad de datos en toda la serie y o si hay un periodo específico en que no se cuenta con ningún dato. Así se conocen las condiciones en que se hallan los registros y se escogen las estaciones y periodos de estudio adecuados.

En el caso de los datos de lluvia es difícil conocer si un registro de cero significa que se ha interrumpido el registro de los datos o si no ha llovido. Se ha considerado entonces que un periodo mayor a dos semanas con registro de



cero da una alerta sobre un posible problema de observación, el cual fue inspeccionado a detalle para definir si fue una pérdida de datos o fue un período seco muy largo (en función a los datos de otras estaciones de lluvia cercanas). Adicionalmente se han encontrado registros con valores superiores a 0,5mm (la capacidad de recolección de los pluviómetros), por lo que se ha debido ajustar estos datos.

3.3. Selección de estaciones y período de análisis

3.3.1. Río Tomebamba

Existen dos estaciones registrando el caudal de este río con datos desde el año 1997 hasta el año 2011: Matadero en Sayausí con ausencia de datos en 129 días distribuidos en 7 años, y Tomebamba en Ucubamba con un faltante de datos de aproximadamente 5 años, como está detallado en la Tabla 1. Se escogió trabajar con la estación Matadero en Sayausí debido al periodo más amplio de datos con el que cuenta.

Tabla 2: Estaciones de caudal. Río Tomebamba.

Estación	Registro de datos	Estado del registro
Matadero en Sayausí	17 Julio 1997 – 31 dic 2011	Ausencia de datos en 129 días distribuidos en 7 años
Tomebamba en Ucubamba	18 abril 1997 – 31 dic 2011	Datos de 1998 a 2003 y de 2008 a 2009 Ausencia de datos de: 6 junio 1997 – 14 julio 1997 (37 días) 14 - 22 de enero 1998 (8 días) 28 abril - 16 julio 1998 (3 meses) 1 agosto 2003 – 31 dic 2007 (4 años, 5 meses)



En el hidrograma de la estación seleccionada, se observa que a partir del año 2006 los caudales pico que superan los $80\text{m}^3/\text{s}$ se presentan con mayor frecuencia.

Para el registro de lluvia existen 3 estaciones (Tabla 2): Pisicola Chirimachay con datos desde 2010, Ucubamba con datos desde 1998 pero que por su ubicación (aguas abajo de la ciudad de Cuenca) no aporta al caudal registrado por la estación de aforo escogida, y Matadero Sayausí con datos desde 1997. Se escogió trabajar con la estación Matadero Sayausí por ubicarse cerca de la estación de aforo previamente seleccionada, y debido al registro más amplio de datos con el que cuenta.

Tabla 3: Estaciones de precipitación. Cuenca de río Tomebamba.

Estación	Registro de datos	Estado del registro
Pisicola Chirimachay	5 enero 2010 – 21 dic 2011	Completo
Matadero Sayausí	22 julio 1997 – 31 dic 2009	Completo
Ucubamba	19 oct 1998 - 30 dic 2009	Completo

3.3.2. Río Tarqui

Cuenta con dos estaciones de aforo Tarqui AJ Yanuncay y Tarqui DJ Cumbe, de las cuales se ha escogido ésta última por poseer un registro más largo y con menos ausencia de datos, como se muestra en la Tabla 4.



Tabla 4: Estaciones de caudal. Río Tarqui.

Estación	Registro de datos	Estado del registro
Tarqui AJ Yanuncay	23 oct 1998 - 31 dic 2009	Ausencia de datos de: 12 – 15 enero 2001 (4 días) 4 – 10 febrero 2001 (7 días) 21 junio – 10 julio 2001 (3 semanas) 1 agosto 2003 – 21 julio 2005 (2 años) 7 – 14 junio 2007 (8 días)
Tarqui DJ Cumbe	19 julio 1997 – 31 dic 2011	Ausencia de datos: 13 abril – 28 mayo 1998 (mes y medio) Septiembre de 1998 (5 días con datos) Mayo a diciembre 1999 (1 dato cada dos horas) Año 2000 (1 dato cada 2 horas)

*Tomando como referencia un dato cada 5 minutos.

Para el registro de lluvia se cuenta con dos estaciones: Tarqui DJ Cumbe que presenta errores a partir de febrero del 2010, y Portete con datos de 1997 hasta 2011. Se escogió la estación Portete por presentar un registro sin errores.

Tabla 5: Estaciones de precipitación. Cuenca del río Tarqui.

Estación	Registro de datos	Estado del registro
El Portete	20 nov 1997 - 30 dic 2011	Completo
Tarqui DJ Cumbe	31 julio 1997 – 31 dic 2011	Completo. Errores a partir del 9 de febrero de 2010



3.3.3. Río Yanuncay

Se disponen de dos estaciones de medición de caudal: Yanuncay en Pucán, que no registró datos durante ocho meses debido a que la crecida de junio del 2007 destruyó el equipo, y Yanuncay AJ Tarqui con un faltante de datos de aproximadamente 7 años (Tabla 6). Para el presente estudio se utilizará la estación Yanuncay en Pucán por contar con un registro de datos en un período más amplio.

Tabla 6: Estaciones de caudal. Río Yanuncay.

Estación	Registro de datos	Estado del registro
Yanuncay en Pucán	16 julio 1997 – 31 dic 2011	Ausencia de datos: 21 junio 2007 – 26 feb 2008 (8 meses)
Yanuncay AJ Tarqui	27 ago 1997 – 26 ago 2011	Ausencia de datos: 9 nov 1997 – 23 enero 1998 (2 meses y medio) 28 mayo – 15 septiembre 1998 (4 meses) 9 mayo 2002 – 1 abril 2008 (6 años)

Para el registro de precipitaciones se cuenta con dos estaciones con similar periodo de toma de datos, se opta por Soldados Cancán puesto que la estación de Pucán carece de 10 meses de datos entre febrero y diciembre de 2004 (Tabla 7).

Tabla 7: Estaciones de precipitación. Cuenca del río Yanuncay.

Estación	Registro de datos	Estado del registro
Soldados Cancán	23 julio 1997 - 30 dic 2011	Completo
Pucán	20 julio 1997 – 31 dic 2011	Ausencia de datos: 7 feb 2004 – 31 dic 2004 (10 meses)



Para las 3 estaciones de caudal que se utilizaron en el presente estudio existen datos diarios casi completos, con faltantes de: 2,35% de datos para *Matadero Sayausí*, 5,18% en *Tarqui Cumbe* y 10,46% en *Yanuncay en Pucán*. Los años que presentan mayores irregularidades son 1998, 1999 y 2000. La estación *Yanuncay en Pucán* adicionalmente presenta problemas en los años 2007 y 2008 debido a que una crecida arrastró el equipo de medición causando que los datos de caudal no se registraran durante 8 meses (21 junio 2007 – 26 feb 2008). Los caudales empiezan a registrarse en julio de 1997. Por otro lado, en promedio las estaciones *Matadero Sayausí* y *Tarqui Cumbe* registraron un dato cada 49 minutos, mientras que la estación *Yanuncay en Pucán* lo hizo cada 40 minutos.

Por lo expuesto, para analizar las crecidas en estos tres ríos se han estudiado los datos correspondientes a eventos específicos.

3.4. Descripción de los métodos a utilizarse

Debido a que los métodos expuestos en la literatura requieren datos de una diversidad de parámetros, se ha escogido un método sencillo que consiste en estudiar no las series completas sino los periodos en que se han presentado inundaciones o crecidas altas, verificando si la precipitación y el caudal registrados por los equipos seleccionados, o la combinación de ambos, alcanzan a explicar el desencadenamiento de las crecidas. Para el cumplimiento de estos objetivos, se identificaron los caudales que han producido desbordamiento de ríos, posteriormente se analiza el comportamiento de la precipitación y del caudal para los 10 eventos más fuertes registrados en cada río, y finalmente se determina la relación entre el caudal pico y el caudal con el que inició la crecida.



3.4.1. Definición de umbrales

Para la determinación de los eventos que servirán para los análisis antes referidos, se han seleccionado 3 umbrales definidos como valores a partir de los cuales es posible identificar y describir alguno de los efectos de las crecidas para cada cuenca. El primer umbral corresponde al caudal que ha producido desbordamientos, y para su determinación se ha tenido en cuenta los registros de inundaciones recogidos por la prensa local. El segundo umbral es aquél que abarca los 10 eventos de crecidas mayores (que no necesariamente produjeron una inundación), con los cuales se ha estudiado el comportamiento de la precipitación y del caudal para las 3 semanas anteriores al evento. Finalmente, el tercer umbral es aquél que abarca las 30 mayores crecidas, para las cuales se ha analizado la relación del caudal pico de la crecida con respecto al caudal con el que inició el ascenso de la misma.

3.4.2. Condiciones antecedentes a la crecida

Es de interés conocer si la lluvia acumulada en un determinado intervalo de tiempo previo a la crecida es extrema, o dicho de otra manera, conocer si una lluvia extrema siempre genera una crecida. A través de esta información es factible determinar si el pluviómetro se ubica en un sitio representativo de la cuenca, considerando el gran tamaño de la misma, ya que es posible que la lluvia que genera la inundación se esté presentando en otro punto de la cuenca.

Para esto, se ha formado un ranking de los eventos contenidos en el umbral 2, en el que se ubican de mayor a menor tanto las descargas como los volúmenes de precipitación durante las 3 semanas previas al evento de crecida.

Para el ranking del registro de escorrentía se ha calculado el *caudal promedio acumulado* inmediato anterior a la crecida, de 1 día antes de la crecida, 2, 3, hasta 10 días, 2 semanas y 3 semanas antes (se ha intentado mantener estos intervalos de tiempo para todos los eventos, sin embargo en determinados casos ha dependido de la calidad y/o disponibilidad de datos de los mismos). A continuación, se agruparon las descargas de todos los eventos de una estación



para cada uno de los intervalos de tiempo antes mencionados (los caudales promedio de un 1 día previo a la crecida de todos los eventos, de 2 días, ..., de 3 semanas) y se los ordenó del mayor al menor para formar el ranking. Para el ranking del registro de precipitaciones en cambio se han calculado los *volúmenes acumulados* para los mismos intervalos de tiempo utilizados para los caudales, y se ha seguido el mismo procedimiento recién descrito para el registro de escorrentía. En ambos casos se incluyó además la fecha del evento para así comparar los meses en que se han producido crecidas.

De esta manera se compararán los rankings de precipitación y caudal de cada evento, para identificar 3 comportamientos: 1) Si los caudales extraordinarios vienen acompañados de precipitaciones extraordinarias, 2) Si el puesto que ocupa un evento en el ranking el día de la crecida se mantuvo o no durante las 3 semanas (para verificar crecidas repentinas), y 3) Si las variaciones en el puesto que ocupa la precipitación en el ranking durante las 3 semanas de estudio, se ven reflejadas en variaciones en el puesto que ocupa en el ranking el correspondiente caudal.

Adicionalmente se definió un índice P/Q (*volumen de precipitación acumulada sobre caudal promedio acumulado*) que describe la correspondencia en el ranking entre lluvia y caudal para cada uno de los intervalos definidos anteriormente. Un valor de 1 significa que ambos parámetros se ubican en el mismo puesto del ranking, mientras que valores mayores a uno implican que la precipitación ha sido más excepcional que el caudal, y valores menores a uno significan lo contrario. Mientras más se alejan estos valores de la unidad menor será la relación entre los puestos en el ranking de la precipitación y caudal.

3.4.3. Precipitación

A través de un estudio de las precipitaciones que han antecedido a las crecidas presentadas en los 14 años de datos, se pretende identificar tendencias de lluvia generadoras de crecida de modo que, en lo futuro, al presentarse éstas sea factible desencadenar una alerta de posible inundación. Para la



determinación de estas tendencias se ha definido el siguiente procedimiento:

- 1) Se grafican los volúmenes de precipitación acumulada durante los 21 días previos a la crecida para cada evento, y se identifican eventos con tendencias similares que puedan ser agrupadas, definiendo así algunos tipos de tormentas.
- 2) Una vez identificados los tipos de tormenta para cada estación, se grafican todos los eventos de lluvia pertenecientes a cada clase de tormenta, con el propósito de determinar *volúmenes de precipitación acumulada* en un determinado *número de días* que provocan crecidas en cada uno de los 3 ríos. Se estudian los volúmenes de precipitación acumulada tanto al momento de producirse la crecida, como algunos valores previos, que encenderían la alerta.

3.4.4. Precipitación y Caudal combinados

Un determinado volumen de precipitación acumulada requiere de otros factores, como el nivel de saturación del suelo, para desencadenar una crecida. De igual manera, el caudal por sí solo no es un buen desencadenador de alerta porque un valor determinado puede alcanzarse varias veces sin que se produzca la crecida; en la figura 1 se puede observar que en un lapso menor a 3 semanas en la estación Matadero Sayausí se registraron caudales tan altos como 40, 60 y 80m³/s, durante 22, 12 y 5 ocasiones respectivamente. Por el contrario un caudal bajo puede convertirse en una descarga de crecida en cuestión de horas, tiempo insuficiente para tomar medidas de prevención; así en la estación Matadero Sayausí un caudal de 6,44m³/s ascendió a 60,25 m³/s en una hora, en Tarqui Cumbe un caudal de 1,59m³/s ascendió a 16,19m³/s en 5 horas, y en Yanuncay en Pucán un caudal de 5,88m³/s ascendió a 61,46m³/s en dos horas y media. Por otro lado, un valor de descarga muy alto podría obviar situaciones en las que con una descarga menor deban tomarse algunas precauciones para evitar perjuicios a la población. Es así que si bien el dato que maneja ETAPA para la alerta de crecida para el río Tomebamba es de 160m³/s, en los 14 años



de registro utilizados para esta investigación el mayor caudal registrado fue de $154\text{m}^3/\text{s}$, el cual en la realidad significó que el cuerpo de Bomberos de Cuenca deba encender la alerta para evitar eventuales posibles tragedias. Es así que el establecimiento de algunos niveles de caudal podría ser útil para alertar al personal que trabaja en gestión de riesgos, sin embargo, para alertar a la ciudadanía es necesario contar con parámetros más precisos.

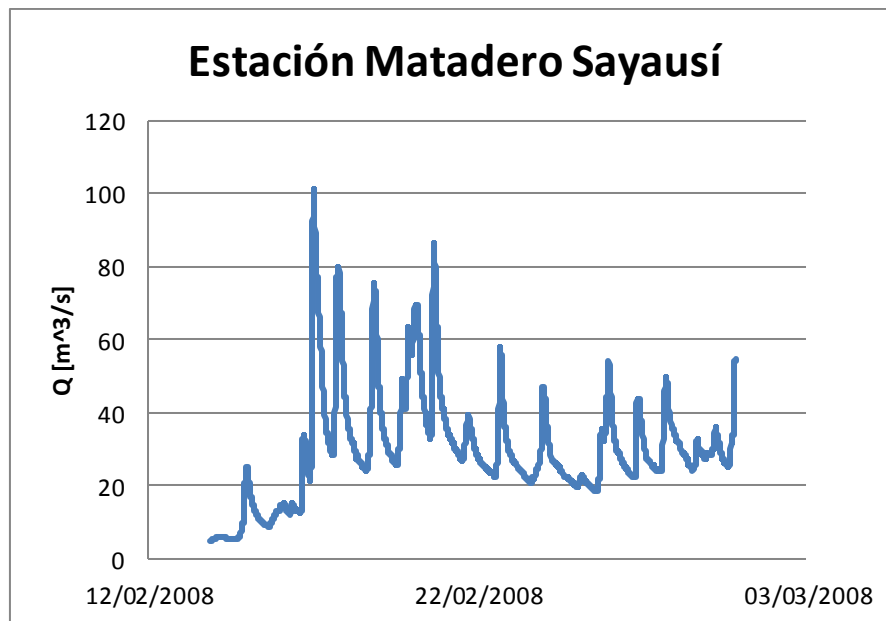


Figura 1: Hidrograma, estación Matadero Sayausí

Por lo expuesto, se propone un método que combina precipitación (P) y caudal (Q), con el objetivo de identificar patrones de desencadenamiento de crecidas. La lógica de fondo es que si se logra identificar un patrón, éste puede ser utilizado como un método de alerta temprana. Esto se realizó de la siguiente manera:

En primer lugar, para cada uno de los eventos contenidos sobre el segundo umbral en las 3 estaciones de caudal, se graficó el *Caudal Diario vs Volumen de Precipitación acumulada desde 3 semanas previas a la crecida*. El análisis de esta figura ha permitido determinar la existencia o no de patrones de desencadenamiento de crecidas, los cuales pueden servir como un sistema de alerta dependiendo del número de días que toman para definir una trayectoria



(una línea recta). Para el reconocimiento de estos patrones se ha utilizado la pendiente de la línea como indicador, identificando una pendiente mínima que sea común a todos, o a la mayoría de gráficos, para un determinado número de días.

Se puntualizan entonces 3 parámetros que definirían el patrón buscado en el gráfico *Caudal diario vs Volumen de Precipitación Acumulada*: el número de días que el gráfico tarda en definir una trayectoria, la pendiente de dicha trayectoria, y un coeficiente de regresión lineal R^2 que permita precisar el ajuste del comportamiento del gráfico a una línea recta.

De esta manera se puede estudiar cada cuenca hidrográfica, relacionando los caudales y lluvias previas a un evento de crecida, para conocer si es posible o no identificar patrones que se constituyan en un sistema de alerta temprana.

3.4.3. Relación del caudal pico de la crecida con respecto al caudal con el que inició el ascenso de la misma.

Para el tercer umbral, que abarca 30 crecidas, se ha debido separar los hidrogramas por evento para así determinar los dos valores requeridos, y calcular la relación:

$$\frac{Q_{pico}}{Q_{base}}$$

En donde Q_{pico} corresponde al caudal máximo de la crecida, y Q_{base} es el caudal mínimo previo a la misma. Adicionalmente se ha determinado el tiempo que toman las crecidas para configurarse en cada cuenca.

Estos procedimientos permitirán comparar el comportamiento de las crecidas en las 3 cuencas en estudio, y de esta manera complementar los resultados obtenidos a través de los métodos expuestos en los puntos anteriores.



4. Resultados y Discusión

4.1. Definición de umbrales

UMBRAL 1:

Un caudal de **179,35m³/s** produjo el desbordamiento del río Yanuncay en Marzo de 2005, mientras que un caudal de 197,74m³/s produjo el desbordamiento de este río en Junio de 2007. En ese mismo mes y año con un caudal de 154,68m³/s el río Tomebamba despertó la alerta del Cuerpo de Bomberos según la prensa, pero sin registrarse desbordamientos.

Por otro lado, en octubre de 1999 un caudal de **33,59 m³/s** (la onceava crecida más alta) desbordó el río Tarqui; un caudal de 43,21m³/s (el 5to caudal más alto registrado en los 14 años) provocó un nuevo desbordamiento el 5 de abril del 2006. En Junio de 2007 el caudal llegó hasta los 33,19m³/s provocando la muerte de una persona arrastrada por el río. En febrero de 2008 el caudal alcanzó los 80,304m³/s provocando el desbordamiento del río.

UMBRAL 2:

En la estación *Matadero Sayausí* se han identificado 13 crecidas por encima de los **80m³/s** que se han presentado en los años 1997, 1998, 1999, 2007, 2008 y 2009.

En la estación *Tarqui Cumbe* se han presentado 14 crecidas por encima de los **31m³/s**, en los años 1999, 2006, 2007, 2008, 2009 y 2011.

En la estación Yanuncay en Pucán se registraron 12 crecidas que superaron los **90m³/s**, en los años 2001, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009, 2010, 2011.



UMBRAL 3:

Para la estación *Matadero Sayausí* se ha definido a **55m³/s** como el caudal del umbral 3, abarcando a 28 crecidas independientes. En la estación *Tarqui Cumbe* un caudal de **16m³/s** comprende 35 crecidas. En el caso de *Yanuncay en Pucán* este valor límite es **60m³/s**, abarcando 28 crecidas.

Análisis

El dato de alerta de desbordamiento que maneja ETAPA de 160m³/s para los ríos Tomebamba y Yanuncay se adapta a los umbrales encontrados en esta investigación, puesto que el río Tomebamba no superó los 155m³/s sin presentar desbordamientos, mientras que el río Yanuncay se desbordó a los 179,35m³/s. No es ése el caso del dato de alerta de 90m³/s para el río Tarqui, el cual apenas superó los 30m³/s presentando desbordamientos.

Sin embargo, de los umbrales que abarcan 10 y 30 crecidas se desprende que los caudales que presenta el río Yanuncay son superiores a los del río Tomebamba, por lo que un mismo valor de 160m³/s para ambos ríos parecería inadecuado.

En el caso del río Tarqui, el penúltimo caudal más bajo dentro de aquéllos que superan el segundo umbral, se registra en la prensa como responsable del desbordamiento de este río, mientras que el caudal más bajo registrado en este rango provocó la muerte de una persona al ser arrastrada por el río. Sin embargo, no todos los 14 eventos señalados sobre este umbral constan como desbordamientos en la prensa, lo cual hace suponer que los continuos desbordamientos que presenta este río provocan que no sean noticia a menos que provoquen daños mayores como la destrucción de casas, cultivos o la muerte de animales o personas. Cabe señalar que estos desbordamientos no se presentaron dentro de la ciudad de Cuenca sino en la parte media de la












microcuenca (en los sectores de Guzho y Victoria del Portete) en donde el cauce del río, antiguamente serpenteante, fue modificado para la construcción de la vía Cuenca-Loja.

4.2. Condiciones antecedentes a la crecida

Con el objetivo de describir qué tan extraordinarias han sido las precipitaciones para cada una de las crecidas estudiadas, se ha formado un ranking tanto del *volumen de precipitación acumulado* como del *caudal promedio acumulado*, para cada día hasta 3 semanas previo a la crecida. De estos resultados se desprende además la pertinencia de los pluviómetros seleccionados para describir las crecidas en estudio.

Para la descripción del índice P/Q se ha utilizado la siguiente escala de colores:

	P/Q
	<0,4
	0,4 – 0,5
	0,6 – 0,7
	0,8 – 0,9
	1
	1,1 – 1,4
	1,5 – 1,8
	1,9 – 2,2
	>2,2

En donde, valores inferiores a 1 indican que históricamente la precipitación ocupó puestos superiores en el ranking, en comparación con aquellos ocupados por el caudal correspondiente. Valores superiores a 1 indican lo contrario.



4.2.1. Resultados para la cuenca del río Tomebamba

Tabla 8: Ranking Matadero Sayausí

MATADERO SAYAUSÍ				RANKING														
Evento	Fecha	Caudal	Ranking		1 día	2 días	3 días	4 días	5 días	6 días	7 días	8 días	9 días	10 días	2 semanas	3 semanas	P/Q	
1	26/11/1997	97,269	7	Precipitación	8	11	11	12	10	8	6	7	8	8	8	9	1,4	
				Caudal	5	5	6	5	6	6	7	7	8	8	9	10		
2	11/02/1998	79,776	13	Precipitación	1	1	1	3	4	5	8	8	9	9	12	13	0,5	
				Caudal	13	13	13	13	13	13	13	12	13	13	12	13		
3	29/10/1998	81,040	11	Precipitación	5	3	2	1	2	1	1	1	1	1	3	7	0,3	
				Caudal	8	8	8	8	8	8	8	13	9	9	10	9		
4	10/04/1999	88,908	9	Precipitación	6	7	9	9	7	4	4	5	6	6	4	8	1,5	
				Caudal	3	4	3	3	5	5	5	5	4	5	6	6		
5	15/06/2007	154,683	1	Precipitación	13	5	3	5	5	7	7	6	7	7	10	11	5,2	
				Caudal	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2		
6	21/06/2007	130,632	2	Precipitación	4	10	8	8	11	12	9	9	4	3	5	6	4,5	
				Caudal	4	3	4	4	3	2	1	1	1	1	1	1		
7	17/02/2008	101,278	5	Precipitación	3	4	7	7	8	10	11	12	12	11	1	5	0,7	
				Caudal	10	10	11	11	11	11	11	10	11	11	11	11		
8	20/02/2008	86,439	10	Precipitación	11	6	6	2	1	2	2	2	2	2	6	2	1,6	
				Caudal	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3		
9	12/04/2008	92,182	8	Precipitación	9	8	4	4	3	3	3	3	3	4	2	1	0,6	
				Caudal	6	6	5	6	7	7	6	6	7	7	7	8		
10	01/06/2008	99,721	6	Precipitación	12	13	13	13	12	11	12	10	10	10	9	4	2,1	
				Caudal	7	7	7	7	4	4	4	4	5	6	5	4		
11	29/01/2009	114,333	4	Precipitación	10	12	12	11	9	6	5	4	5	5	7	3	0,8	
				Caudal	12	12	10	10	9	9	9	9	10	10	8	5		
12	30/04/2009	80,945	12	Precipitación	7	9	10	10	13	13	13	13	13	13	11	10	1,6	
				Caudal	11	9	9	9	10	10	10	8	6	4	4	7		
13	11/06/2009	121,272	3	Precipitación	2	2	5	6	6	9	10	11	11	12	13	12	0,7	
				Caudal	9	11	12	12	12	12	12	11	12	12	13	12		

$P/Q_{\text{promedio}} = 1,6$

7 de las 13 crecidas se mantienen constantes en el ranking, independientemente del lugar que ocupan en éste (primero, segundo, sexto, séptimo, octavo, onceavo y treceavo) y del mes (febrero, abril, junio, octubre, noviembre). Se observa que el puesto en el ranking que ocupan la mayoría de



estas crecidas, no es afectado por las oscilaciones del ranking de la precipitación correspondiente.

5 de las 13 crecidas presentan cambios bruscos en sus puestos en el ranking. Las crecidas que ocuparon puestos altos (tercero, cuarto, quinto), ascendieron repentinamente el día mismo del evento, escalando 6, 8 y 5 puestos; estas crecidas presentaron precipitaciones extraordinarias los dos días previos, en dos de los 3 casos. Mientras que, crecidas que se ubicaron en la parte baja del ranking (novena, décima), descendieron repentinamente 6 y 8 puestos; en ambos casos se observa un descenso de la precipitación en el ranking. Se presentaron en los meses de enero, febrero, abril y junio. Cabe resaltar que la décima crecida ocupó puestos altos en el ranking los días previos puesto que se presentó dos días después de la anterior crecida; a partir de 4 días previo a la crecida el caudal se ubicó por encima de los $50\text{m}^3/\text{s}$, producto de las precipitaciones extraordinarias sostenidas durante la anterior semana.

La doceava crecida descendió progresivamente 8 puestos durante 2 semanas producto de una semana de la precipitación históricamente más baja; se produjo en el mes de abril.

Índice P/Q

En cuanto al índice P/Q, el promedio de la estación es de 1,6 indicando que históricamente los puestos en el ranking ocupados por la precipitación han sido menores a los del caudal. Específicamente se muestran de la siguiente manera:

Las crecidas más fuertes (primera y segunda) presentan un índice P/Q cercano a 5, indicando que estos caudales extraordinarios fueron independientes de la precipitación que los acompañó. Las crecidas tercera, cuarta y quinta (que como se estableció anteriormente fueron repentinas) presentan índices cercanos a 0,7 que indican la incidencia de las precipitaciones en el ascenso del caudal. A partir de la sexta crecida los índices se ubican por encima de 1,5, indicando que los caudales fueron históricamente más altos que las



precipitaciones que los acompañaron.

Excepcionalmente, las crecidas onceava y treceava presentaron precipitaciones extraordinarias junto con los caudales más bajos registrados, indicando una discordancia entre el ranking que ocuparon estos dos parámetros. En estos dos casos se presentaron precipitaciones repentinas (acumulación de una semana y de dos días respectivamente) sin que haya llovido previamente durante las 3 semanas de estudio; al tratarse de caudales y volúmenes acumulados, los valores extraordinarios de los días cercanos a la crecida afectaron los valores calculados haciéndolos aparecer como si se hubieran mantenido altos durante las 3 semanas.



4.2.2. Resultados para la cuenca del río Tarqui

Tabla 9: Ranking Tarqui Cumbe

TARQUI CUMBE				RANKING													P/Q
Evento	Fecha	Caudal	Ranking	1 día	2 días	3 días	4 días	5 días	6 días	7 días	8 días	9 días	10 días	2 semanas	3 semanas		
1	24/04/1999	34,001	9	Precipitación	10	11	11	11	11	6	7	7	7	8	6	8	2,0
				Caudal	8	5	4	4	4	4	4	3	4	4	5	5	
2	03/05/1999	33,188	12	Precipitación	11	12	12	12	12	7	8	8	8	9	7	9	4,8
				Caudal	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
3	21/06/1999	33,188	13	Precipitación	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	12	12	2,5
				Caudal	9	4	5	3	5	6	6	5	5	5	6	6	
4	04/10/1999	33,593	11	Precipitación	7	8	9	10	8	12	5	4	4	4	4	6	1,4
				Caudal	13	13	10	10	8	3	3	4	3	3	3	3	
5	05/04/2006	43,208	5	Precipitación	1	1	1	1	2	3	3	3	3	1	1	1	0,2
				Caudal	5	8	8	7	7	9	8	11	11	11	11	11	
6	09/04/2007	35,660	7	Precipitación	4	5	5	4	4	4	4	5	5	5	5	5	0,3
				Caudal	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	
7	04/05/2007	36,082	6	Precipitación	5	6	7	7	7	9	11	10	9	7	8	10	0,7
				Caudal	12	12	13	12	12	12	12	12	12	12	12	12	
8	13/06/2007	33,188	14	Precipitación	8	7	8	8	9	11	9	9	10	10	11	11	1,4
				Caudal	6	7	6	6	6	7	7	7	7	7	8	8	
9	17/02/2008	45,535	3	Precipitación	6	4	4	5	5	5	6	6	6	6	10	7	0,6
				Caudal	10	10	11	11	11	11	11	10	10	10	10	9	
10	20/02/2008	80,304	1	Precipitación	3	3	3	2	1	2	2	1	2	3	3	3	2,3
				Caudal	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
11	22/09/2008	72,946	2	Precipitación	9	9	6	6	6	10	12	12	12	12	13	13	2,1
				Caudal	3	3	3	5	3	5	5	6	6	6	7	7	
12	15/02/2009	33,822	10	Precipitación	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	1,1
				Caudal	11	11	12	13	13	13	13	13	13	13	13	13	
13	03/05/2009	44,041	4	Precipitación	12	10	10	9	10	8	10	11	11	11	9	4	1,4
				Caudal	4	6	7	9	10	8	9	8	9	9	4	4	
14	08/04/2011	35,086	8	Precipitación	2	2	2	3	3	1	1	2	1	2	2	2	0,2
				Caudal	7	9	9	8	9	10	10	9	8	8	9	10	

$P/Q_{\text{promedio}} = 1,5$

3 de las 14 crecidas se mantienen constantes en el ranking, independientemente del lugar que ocupan en éste (primera, octava y décima).



Ocurren durante los meses de febrero y abril. En ninguno de los 3 casos se observa que el puesto que ocupa el caudal en el ranking se vea afectado por el puesto ocupado por la precipitación correspondiente.

8 de las 14 crecidas presentan cambios bruscos en sus puestos en el ranking, ocurren en los meses de abril, mayo y junio. Las crecidas tercera, sexta y séptima, ascendieron repentinamente el día mismo del evento, escalando entre 6 y 7 puestos; en los 3 casos se observa la influencia de la precipitación en el ascenso. Mientras que, crecidas que se ubicaron en la parte baja del ranking (novena, doceava, treceava y catorceava), descendieron repentinamente entre 5 y 10 puestos; en todos los casos los eventos estuvieron acompañados de precipitaciones ubicadas en los lugares más bajos del ranking. La crecida que se ubicó onceava descendió repentinamente, junto con la precipitación, 5 días previos al día del evento.

3 crecidas presentan cambios progresivos. La segunda, cuarta y quinta ascendieron entre 5 y 6 puestos durante al menos 1 semana; se produjo en el mes de abril; en estos tres eventos el comportamiento de la precipitación varía para cada caso.

Índice P/Q

En cuanto al índice P/Q, el promedio de la estación es de 1,5 indicando que históricamente los puestos en el ranking ocupados por la precipitación han sido menores a los del caudal. Específicamente se muestran de la siguiente manera:

Las crecidas más fuertes (primera y segunda) presentan un índice P/Q superior a 2; estos caudales extraordinarios fueron acompañados en el ranking por la precipitación aunque ésta siempre ocupó puestos menores. Las crecidas tercera hasta la octava (con excepción de la cuarta) presentan índices entre 0,2 y 0,7 que indican la incidencia de las precipitaciones en el ascenso del caudal. A partir de la novena crecida los índices son superiores a 1, indicando que los caudales fueron históricamente más altos que las precipitaciones que los



acompañaron; en 4 de los 5 casos estas precipitaciones bajas provocaron el descenso del caudal en el ranking.

4.2.3. Resultados para la cuenca del río Yanuncay

Tabla 10: Ranking Yanuncay en Pucán

YANUNCAY EN PUCÁN				RANKING													
Evento	Fecha	Caudal	Ranking		1 día	2 días	3 días	4 días	5 días	6 días	7 días	8 días	9 días	10 días	2 semanas	3 semanas	P/Q
1	11/06/2001	98,520	9	Precipitación	10	5	6	7	7	8	9	8	9	10	10	11	8,6
				Caudal	1	1	-	1	1	1	1	-	1	1	1	1	
2	09/03/2005	179,348	2	Precipitación	6	7	3	3	1	1	1	2	3	2	5	3	0,4
				Caudal	8	8	4	8	6	7	7	6	7	7	8	8	
3	07/04/2006	118,457	5	Precipitación	9	8	2	1	2	2	2	1	2	3	1	1	0,5
				Caudal	7	5	3	4	5	6	5	4	5	6	5	5	
4	14/06/2007	197,740	1	Precipitación	7	6	7	8	8	7	6	4	4	5	6	5	2,3
				Caudal	2	2	2	3	3	3	3	2	3	3	4	4	
5	21/06/2007	179,348	3	Precipitación	1	9	9	9	9	10	4	3	1	1	2	2	1,4
				Caudal	3	3	-	-	-	-	2	1	2	2	2	2	
6	03/03/2008	90,698	12	Precipitación	8	10	10	6	6	3	-	-	-	-	-	-	1,1
				Caudal	11	9	7	5	4	4	-	-	-	-	-	-	
7	27/05/2008	123,637	4	Precipitación	5	2	4	5	5	5	5	5	5	4	4	4	0,6
				Caudal	9	11	9	10	9	9	9	7	6	5	6	6	
8	11/06/2009	111,771	6	Precipitación	3	4	8	10	10	11	10	11	11	11	11	10	0,9
				Caudal	12	12	10	11	10	11	11	10	11	11	11	11	
9	07/02/2010	98,202	10	Precipitación	4	1	1	2	3	4	3	6	6	6	7	8	0,6
				Caudal	6	7	5	6	-	5	6	5	8	8	9	10	
10	28/05/2011	90,698	11	Precipitación	2	3	5	4	4	6	7	7	7	8	9	9	0,7
				Caudal	4	6	6	7	7	8	8	8	9	10	10	9	
11	06/07/2011	108,947	7	Precipitación	11	11	11	11	11	9	8	9	10	7	3	6	1,0
				Caudal	10	10	8	9	8	10	10	9	10	9	7	7	
12	08/07/2011	100,808	8	Precipitación	12	12	12	12	12	12	11	10	8	9	8	7	4,2
				Caudal	5	4	1	2	2	2	4	3	4	4	3	3	

P/Q promedio= 1,9



4 de las 12 crecidas se mantienen constantes en el ranking (primera, tercera, quinta y séptima). En todos los casos no se observa que el puesto del caudal en el ranking sea afectado por el de la precipitación.

7 de las 12 crecidas presentan cambios bruscos en sus puestos en el ranking, ocurren en los meses de febrero, marzo, mayo, junio y julio. Las crecidas segunda, cuarta y sexta, ascendieron repentinamente el día mismo del evento, escalando 6 puestos; en los 3 casos se observa la influencia de una precipitación históricamente alta en el ascenso del caudal. Las crecidas más bajas (octava, novena, décima y onceava) descienden repentinamente de 4 hasta 8 puestos. Dos de estos descensos, los ocurridos en junio y julio, pueden ser explicados por las precipitaciones históricamente bajas que las acompañaron; mientras que los otros dos eventos, presentados en febrero y mayo, por el contrario tuvieron precipitaciones incluso extraordinarias, que no explican el repentino descenso del caudal. En estos dos últimos casos sucedió que fueron crecidas repentinas que presentaron precipitación repentina, pero dado el caudal tan bajo que venían presentando no alcanzaron un valor de descarga alto el día del evento. Asimismo, la novena crecida, que aparentemente desciende 8 puestos del 1ero al 9no, en realidad mantuvo su caudal por debajo de los $5\text{m}^3/\text{s}$ durante casi las 3 semanas previas al evento, y crece repentinamente 2 días antes. Esto significa que el caudal repentinamente alto de los dos días previos a la crecida habría mantenido alto el promedio de las 3 semanas.

Una crecida presenta un descenso progresivo del cuarto al doceavo puesto, el cual no puede ser completamente descrito puesto que únicamente se cuenta con 6 días de datos. Se observa sin embargo un descenso de la precipitación en el ranking.

Índice P/Q

En cuanto al índice P/Q, el promedio de la estación es de 1,9 indicando que



históricamente la precipitación ha ocupado puestos más bajos en el ranking que el caudal, es decir, que las crecidas no serían producto de precipitaciones extraordinarias. Específicamente, el comportamiento ha sido el siguiente:

La crecida más fuerte presenta un índice P/Q superior a 2, indicando que el caudal extraordinario fue independiente de la precipitación que lo acompañó. A partir de la segunda crecida, los índices son inferiores a 1, indicando la incidencia de las precipitaciones en el ascenso del caudal. De este grupo se exceptúan la crecida tercera, octava, novena y doceava, en las cuales, exceptuando la tercera, un índice mayor a uno señala que las precipitaciones históricamente bajas provocaron el descenso del caudal.

En la aplicación de esta metodología para la verificación de la influencia de la precipitación en el comportamiento del caudal, se verifican resultados imprecisos cuando los valores cercanos a la crecida son muy altos, puesto que incrementan los resultados de las 3 semanas, haciéndolos parecer que fueron valores extraordinarios durante todas las 3 semanas.

Caudales promedio acumulados diarios y volúmenes de precipitación acumulada más altos registrados:

Comparando los caudales promedio acumulados diarios y los volúmenes de precipitación acumulada más altos registrados en las 3 cuencas en estudio, se observa el siguiente comportamiento:

- Los caudales promedio acumulados diarios más altos registrados históricamente en la estación Matadero Sayausí corresponden a dos eventos que se presentan con 6 días de diferencia en el mes de junio; mientras que las precipitaciones más altas históricamente corresponden a 6 eventos diferentes y se registran en los meses de febrero y octubre.



- Los caudales promedio acumulados diarios más altos registrados históricamente en la estación Tarqui Cumbe corresponden a un evento presentado en el mes de febrero. Otro evento ocurrido en los primeros días del mes de mayo ocupa el segundo puesto durante las 3 semanas de estudio. Las precipitaciones más altas históricamente corresponden a 2 eventos ocurridos en el mes de abril.
- Los caudales promedio acumulados diarios más altos registrados históricamente en la estación Yanuncay en Pucán corresponden a dos eventos que se presentaron en el mes de junio. Las precipitaciones más altas históricamente corresponden a 4 eventos que se registran en los meses de febrero, marzo, abril y junio.

Tabla 11: Caudales promedio acumulados diarios y volúmenes de precipitación acumulada más altos registrados históricamente.

# de días	Matadero Sayausí				Tarqui Cumbe				Yanuncay en Pucán			
	m ³ /s	Mes	mm	mes	m ³ /s	Mes	mm	mes	m ³ /s	Mes	mm	Mes
1 día	101,83	Jun	49,5	Feb	39,096	Feb	48,5	Abr	58,892	Jun	23,5	Jun
2 días	85,935		50,5	Feb	28,319		67,5	Abr	46,438		45,5	Feb
3 días	73,661		54	Feb	23,821		76,5	Abr	34,169		56,5	Feb
4 días	66,303		80,5	Oct	22,923		81	Abr	41,801		58	Abr
5 días	64,048		91,5	Feb	21,630		99	Feb	41,519		62,5	Mar
6 días	58,968		96,5	Oct	19,902		113	Abr	40,971		69	Mar
7 días	64,137		106,5	Oct	19,029		113	Abr	40,341		72	Mar
8 días	69,247		106,5	Oct	18,914		114,5	Feb	33,052		78,5	Abr
9 días	66,523		107	Oct	18,408		117	Abr	40,164		82	Jun
10 días	62,560		109	Oct	18,279		132	Abr	39,989		91	Jun
2 semanas	54,624	123	Feb	17,158	175,5	Abr	39,564	113,5	Abr			
3 semanas	46,918	165,5	Abril	13,467	222,5	Abr	35,318	130	Abr			

En la tabla 4 se observa que los caudales promedio acumulados diarios más altos registrados históricamente en el río Tomebamba son mucho más altos (prácticamente el doble) que los registrados en el río Yanuncay, aun cuando los caudales el día de la crecida de éste último sean superiores. Esto demuestra que las crecidas en el río Yanuncay se presentan de manera repentina,



mientras que en el Tomebamba los caudales ascienden progresivamente.

Por otro lado, las precipitaciones históricamente registradas en la estación Tarqui Cumbe son superiores a las de las otras dos cuencas en estudio, aun cuando el caudal de este río sea el menor de los 3. Esto sugeriría que la precipitación se convierte en escorrentía en menor magnitud en la cuenca del río Tarqui. Por el contrario, en el río Yanuncay, la precipitación se ve rápidamente reflejada en escorrentía, puesto que acumulando el menor volumen de precipitación de las 3 cuencas, presenta las crecidas más fuertes. Otra posibilidad es que, aunque del análisis de los rankings se desprende que existe una influencia de la precipitación en las variaciones del caudal, las precipitaciones que tienen un mayor impacto en el desencadenamiento de la crecida ocurran en sectores no cubiertos por los pluviómetros seleccionados.

4.3. Precipitación

Para cada una de las estaciones de precipitación se han identificado 3 tendencias de lluvia, para las cuales se han planteado ventanas móviles para dar seguimiento a la configuración de estas tendencias. Así por ejemplo, una acumulación de precipitación igual o superior a 120mm en la estación Matadero Sayausí probablemente provocará una crecida, cuya alerta puede desencadenarse según la acumulación de precipitación a los 19 (85mm) y a los 14 días (70mm). Se llaman ventanas móviles debido a que el rango de días para el análisis se toma a partir de la fecha actual hacia atrás, de manera que se puede tener un control diario de los volúmenes de precipitación acumulados.

La misma lógica se utilizará para las otras dos tendencias identificadas y en cada una de las estaciones en estudio. Esta información se muestra en la siguiente tabla:



Tabla 12: Ventanas móviles. Lluvia acumulada.

Tendencia	Ventana	Matadero Sayausí	Portete	Soldados Cancán
1	21 días	120mm	124mm	
	19 días	85mm	97mm	
	16 días			93mm
	14 días	70mm	56mm	77mm
	9 días			50mm
2	14 días	91mm		
	12 días	67mm		
	10 días			65mm
	8 días			42mm
	7 días	26mm		
	3 días			15mm
3	7 días	63mm	70mm	
	4 días			37mm

Matadero Sayausí:

11 de las 13 crecidas estudiadas en la estación Matadero Sayausí se enmarcan en una de las 3 tendencias de precipitación descritas. Las precipitaciones de los eventos 12 y 13 no se corresponden con las ventanas propuestas para esta estación, puesto que como se mostró en la tabla 1, fueron las más bajas registradas. Cabe indicar que el evento 13 se constituyó como la tercera crecida más fuerte, que se produjo por una precipitación que un día previo a la crecida acumuló casi 40mm, sobre un suelo que seguramente se encontraba saturado producto de precipitaciones que dos semanas atrás habían acumulado 20mm durante una semana. Las crecidas repentinas (eventos 2, 7 y 13) presentan precipitaciones históricamente bajas que súbitamente fueron extraordinarias los dos días previos a la crecida.



La mayor parte de eventos (73%) se enmarcan dentro de la tercera tendencia, es decir, una acumulación de precipitación durante la semana previa a la crecida.

Para esta estación, se identifican 2 mecanismos que han producido crecidas: 1) Acumulación permanente de precipitación durante al menos 2 semanas antes de ocurrir la crecida, y 2) Acumulación de precipitación 2 o 3 semanas antes de la crecida, sumada a una fuerte acumulación repentina unos días antes de la misma. Doce de los 13 eventos presentan este comportamiento; solamente el segundo evento presentó una acumulación extraordinaria de precipitación los 3 días previos a la crecida sin que haya habido acumulación durante los días anteriores, convirtiéndose en la crecida más baja de las contenidas en el umbral 2.

Portete:

En la estación Portete, correspondiente a la cuenca del río Tarqui, se han identificado solamente dos tendencias: una que se mantiene durante 3 semanas, y otra repentina, que presenta durante la semana previa a la crecida. Sin embargo las tendencias identificadas abarcan solamente a la mitad de los eventos estudiados. Los eventos 11 y 12, como se mostró en la tabla 2, presentan las precipitaciones más bajas registradas; cabe indicar que el evento 11 se constituyó como la segunda crecida más fuerte, cuyo origen se halló en factores distintos a la precipitación registrada por el pluviómetro seleccionado. La mayor parte de eventos (43%) se enmarcan dentro de la tercera tendencia.

De las tablas 2 y 5 se observa que un ranking bajo en las precipitaciones provoca que un ranking alto del caudal descienda, y viceversa. Sin embargo, solamente para 7 de los 14 eventos estudiados la estación de precipitación escogida refleja el comportamiento de los caudales en las crecidas, es decir, el pluviómetro escogido capta información clave para el estudio de estas inundaciones; mientras que en los otros 7 eventos se presentan precipitaciones bajas que no se enmarcan en ninguna de las tendencias identificadas: dos de



estos eventos, el noveno en febrero y el onceavo en septiembre, corresponden a la segunda y tercera crecidas más altas (ver tabla 2), las cuales tendrían su origen en una precipitación baja sobre un suelo saturado y en una precipitación ocurrida en otro sector de la cuenca, respectivamente. Es así que en el caso del noveno evento, tres semanas antes de la crecida se acumuló una precipitación de casi 60mm durante una semana; en el caso del evento 11 la precipitación no fue captada por el pluviómetro seleccionado.

Por otro lado, dos de los eventos que se presentan en junio, acompañados de una precipitación baja, resultaron en las crecidas más bajas registradas, mientras que los 3 eventos presentados en febrero, abril o mayo, aun con una precipitación baja fueron ascendiendo en el ranking durante las 3 semanas de observación. Asimismo, lluvias extraordinarias produjeron en abril la crecida más fuerte, y en junio la crecida que se ubicó octava en el ranking; la crecida que en febrero registró la precipitación más baja presentó un caudal que no fue el más bajo; la crecida más baja ocurrió en Junio, la cual vino acompañada durante 3 semanas de la precipitación extraordinaria. Es así que las crecidas más fuertes sobre el umbral 2 en el río Tarqui se presentan en los meses de febrero, abril y septiembre, mientras que las más bajas se presentan en el mes de Junio.

Para esta estación, se identifican 3 mecanismos que han producido crecidas: 1) Acumulación permanente de precipitación durante 3 semanas, 2) Precipitación fuerte 3 semanas antes de la crecida, seguida de acumulación sostenida de precipitación, y 3) Ligera acumulación de precipitación (<25mm) seguida de una precipitación fuerte una semana antes de la crecida que se acumula sostenidamente hasta el día de la crecida. Los 14 eventos se enmarcan en alguno de estos mecanismos; en estos eventos, para un volumen de precipitación acumulado cualquiera, el segundo mecanismo genera una mayor crecida, y el tercer mecanismo la menor. Cabe indicar que las crecidas más fuertes fueron generadas por precipitaciones ocurridas en otro punto de la



cuenca, puesto que no se explican por la precipitación registrada por el pluviómetro seleccionado.

Soldados Cancán:

11 de las 12 crecidas estudiadas en la estación Yanuncay en Pucán se enmarcan en una de las 3 tendencias de precipitación descritas. No se corresponde con las ventanas propuestas para esta estación la precipitación del octavo evento solamente, que si bien no es la precipitación más baja registrada, acumuló precipitación 3 semanas previas a la crecida durante una semana, posterior a lo cual la acumulación fue reducida. La mayor parte de eventos (60%) se enmarcan dentro de la tercera tendencia, que corresponde a la acumulación de precipitación durante los 4 días previos a la crecida. La crecida más fuerte se debió a factores distintos de la precipitación registrada en el pluviómetro seleccionado.

Para esta estación, se identifican 2 mecanismos que han producido crecidas: 1) Acumulación permanente de precipitación durante las 2 semanas previas a la crecida, y 2) Ligera acumulación de precipitación (<25mm) durante casi 3 semanas con una acumulación repentina 2 o 3 días antes de la crecida. Once de los 12 eventos se enmarcan dentro de estos mecanismos; solamente el 4to evento presentó un comportamiento distinto, con una fuerte acumulación de precipitación 3 semanas antes de la crecida junto con un ascenso permanente durante la última semana, resultando en la crecida más fuerte.

En 3 semanas la estación de Portete (124mm) acumula un mayor volumen de precipitación que la estación de Matadero Sayausí (120mm) aun cuando esta última presenta caudales mucho mayores (en general la Tarqui Cumbe registra valores inferiores a los $2,5\text{m}^3/\text{s}$, mientras que Matadero Sayausí supera los $5\text{m}^3/\text{s}$). Una situación similar sucede con la precipitación acumulada durante una semana (63mm en Matadero Sayausí y 70mm en Portete). La estación Soldados Cancán por otro lado, acumula precipitaciones solo a partir los 16 días previos a la crecida, lo cual explicaría que las crecidas se presenten de



manera repentina en comparación con los otros dos ríos.

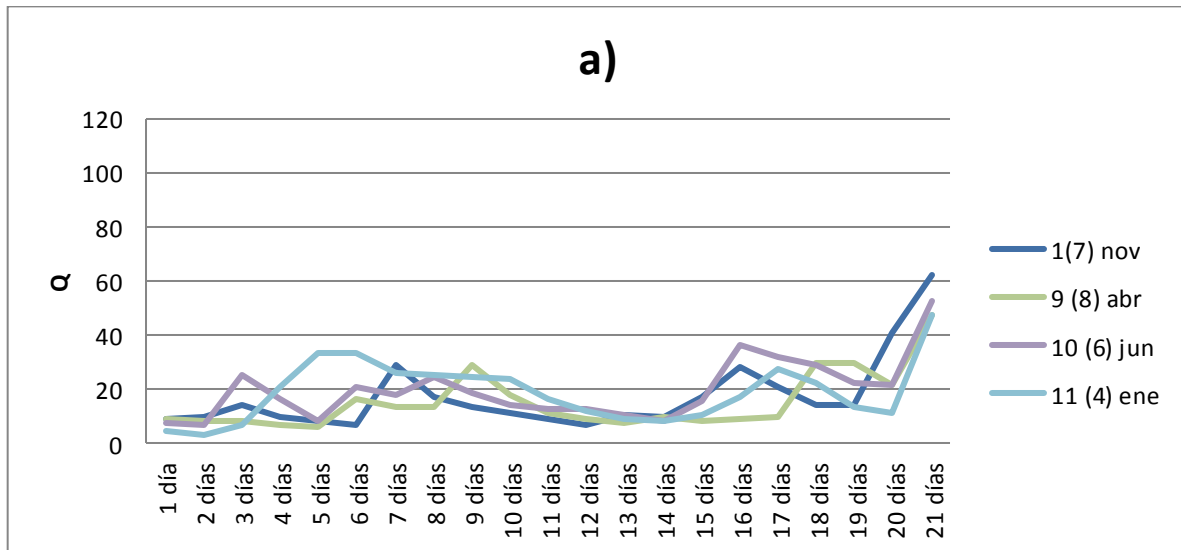
La precipitación registrada en la estación Portete (con excepción de un evento que presentó ascenso de lluvia solamente durante la última semana) se acumula durante las 3 semanas de estudio, en la estación Matadero Sayausí 4 de los 13 eventos presentaron precipitación repentina: dos durante la última semana, y dos durante los últimos dos días; mientras que en la estación Soldados Cancán 5 de los 12 eventos presentaron precipitación repentina.

4.4. Caudal

4.4.1. Matadero Sayausí:

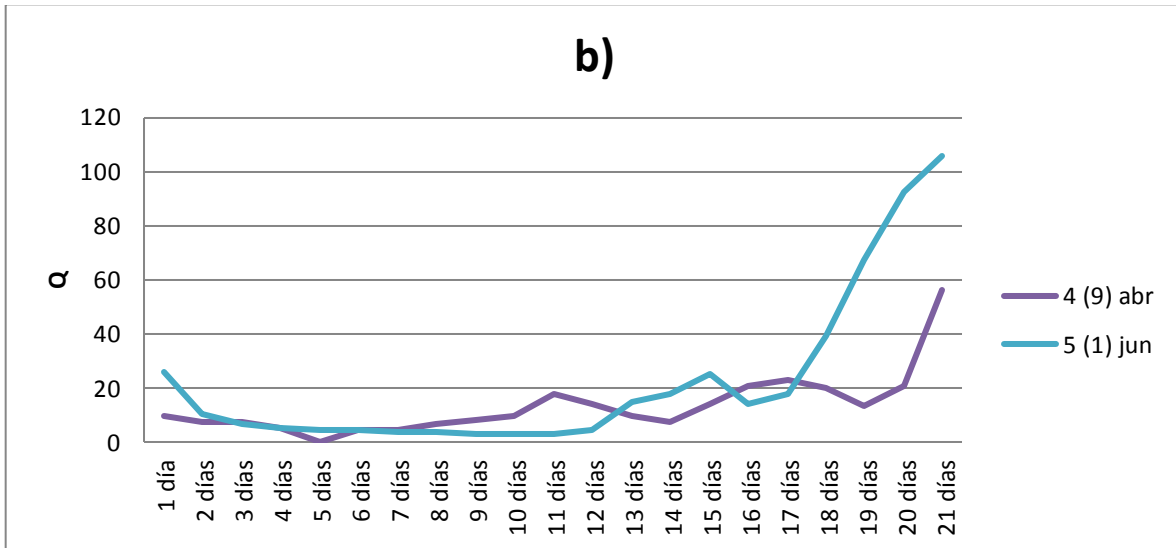
Se han identificado las siguientes tendencias del caudal en las crecidas estudiadas:

- a) El caudal alcanza un pico por encima de los $20\text{m}^3/\text{s}$ alrededor de 2 semanas antes de la crecida; éste desciende hasta $10\text{m}^3/\text{s}$ y vuelve a repetir un pico similar unos 4 o 5 días anteriores a la crecida. Durante la mayor parte del registro el caudal se mantiene por encima de los $10\text{m}^3/\text{s}$.

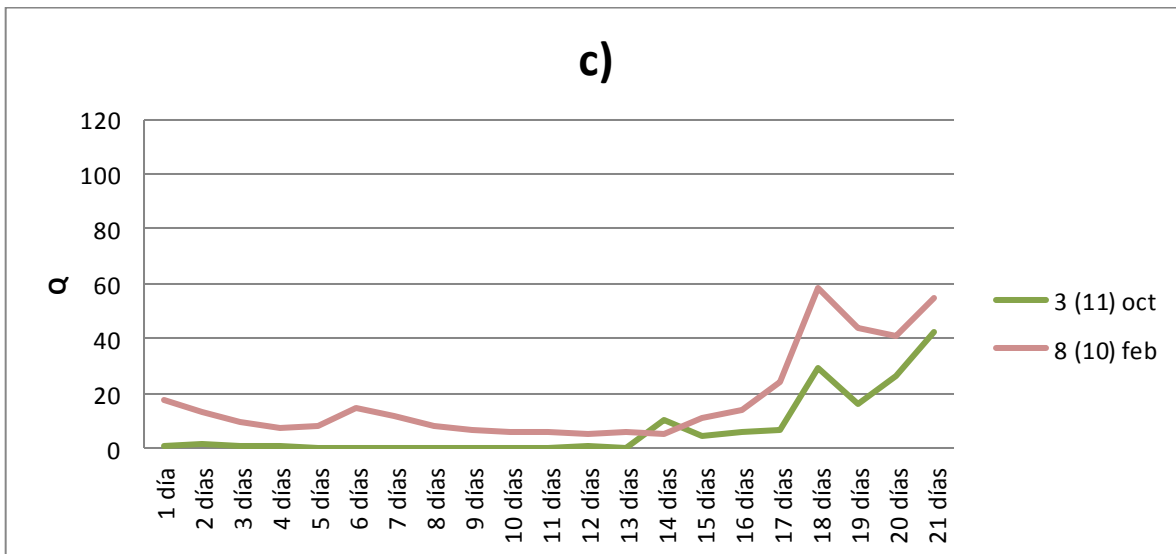




b) A partir de 10 días antes de la crecida, el caudal que venía bajo se ubica cercano a los $20\text{m}^3/\text{s}$ y se mantiene alrededor de ese valor durante una semana aproximadamente.



c) Un caudal que venía bajo inicia el ascenso 7 días antes de la crecida, después de dos desciende ligeramente y retoma el ascenso nuevamente. Estos dos eventos, desde el día 12 hasta el día 18, presentaron las precipitaciones más altas registradas históricamente.

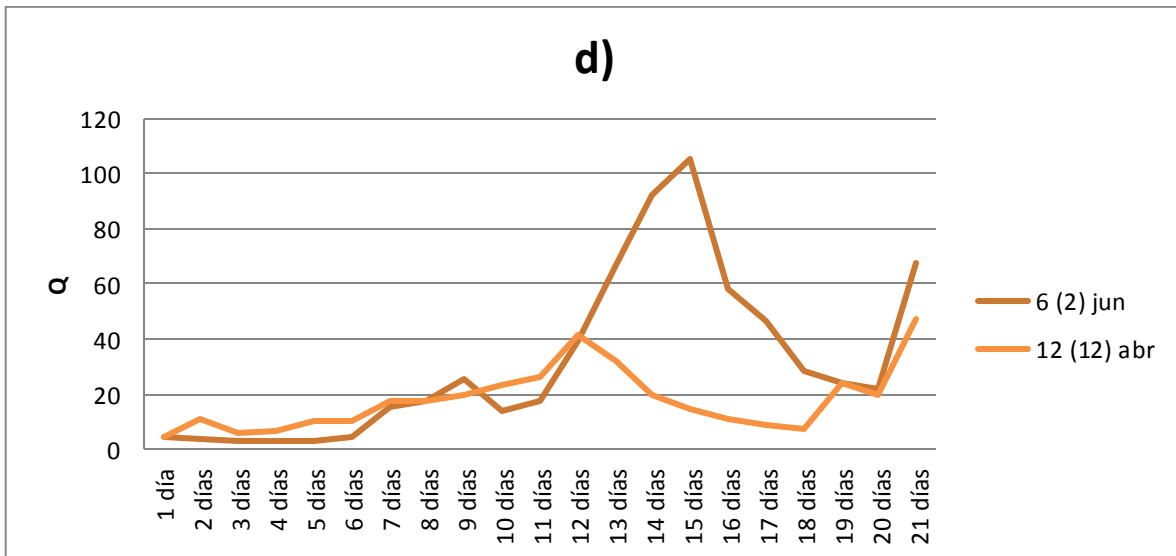


Estos eventos, que venían presentando caudales bajos, inician la crecida

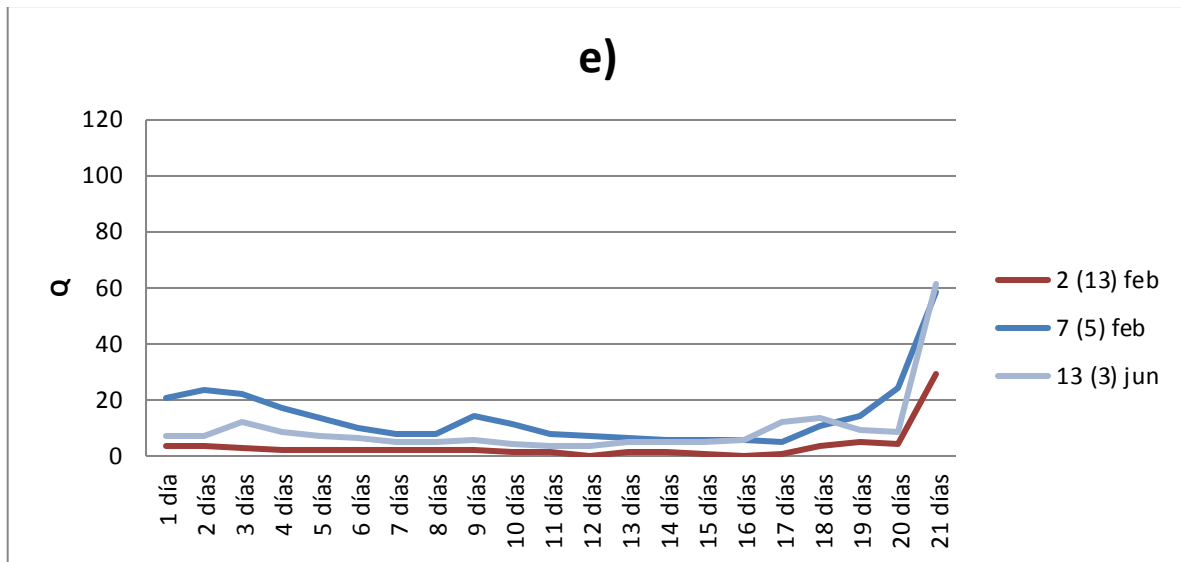


solamente con 4 días de anterioridad, producto de una semana de precipitaciones extraordinarias (ver tabla 1), excepto los dos días previos a la crecida. Sería de esperarse que si la precipitación que acompañó a estos eventos se hubiera mantenido como extraordinaria, las crecidas habrían ocupado los primeros puestos en el ranking.

- d) El ascenso inicia dos semanas previas a la crecida, se observa un fuerte descenso y, un par de días antes se reinicia el aumento de caudal.



- e) La última tendencia de caudal identificada corresponde a un ascenso repentino, que se inicia uno o dos días antes de la crecida. Los 3 eventos que corresponden a este grupo presentaron, durante los dos días previos a la crecida, las precipitaciones más altas registradas (ver Tabla 1).



En definitiva, se observa que un valor de $20\text{m}^3/\text{s}$ que se mantenga durante varios días enciende una alerta, puesto que:

- En 8 de los 13 casos estudiados el caudal se mantiene bordeando los $20\text{m}^3/\text{s}$ durante al menos 10 días hasta dos semanas, en las 3 semanas previas a la crecida.
- Dos eventos superaron los $20\text{m}^3/\text{s}$ solamente desde el 4to día anterior a la crecida. Estos eventos presentaron, durante los 10 días previos a la crecida excepto los últimos 2, las precipitaciones más altas registradas históricamente.
- Otros dos eventos superaron los $20\text{m}^3/\text{s}$ solamente un día antes de la crecida, ambos presentaron durante los dos días previos a la crecida las precipitaciones más altas registradas.

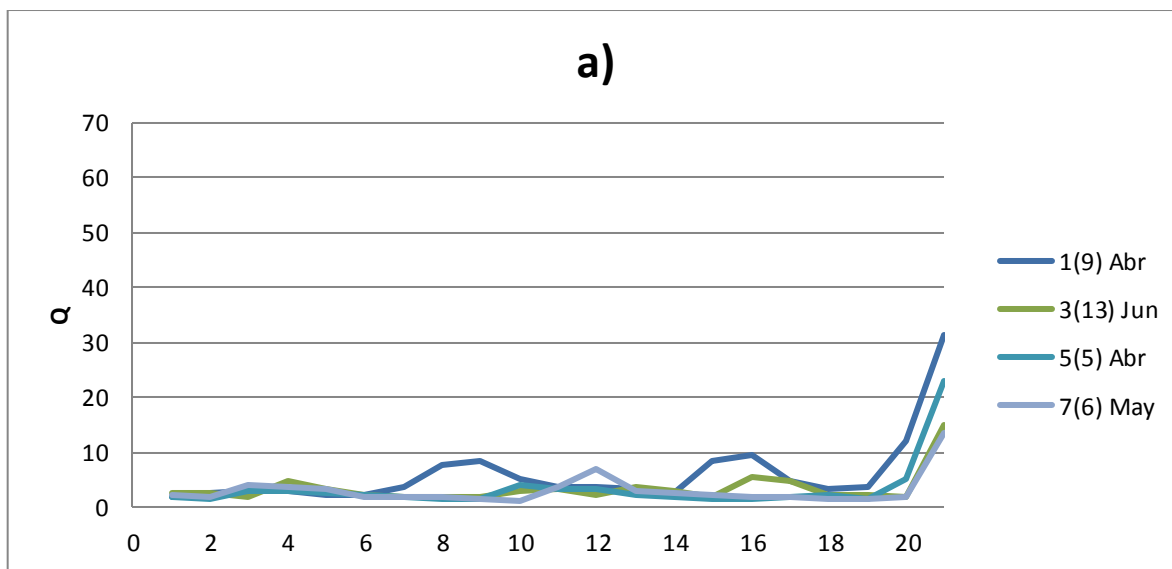
4.4.2. Tarqui Cumbe

Se observa que en todos los casos las crecidas se presentan repentinamente, iniciando el ascenso uno o días antes de la crecida. La identificación de tendencias del caudal se ha realizado considerando el comportamiento anterior

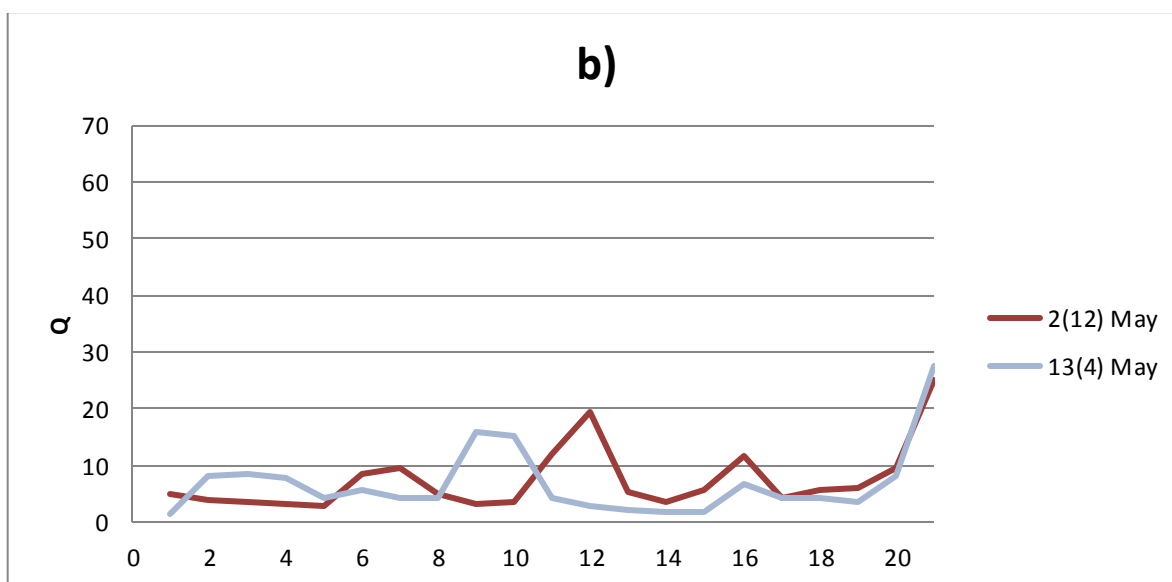


al ascenso. Se han identificado los siguientes grupos:

- a) El caudal se mantiene debajo de los $5\text{m}^3/\text{s}$, bordeando o superando en una o dos ocasiones este umbral.

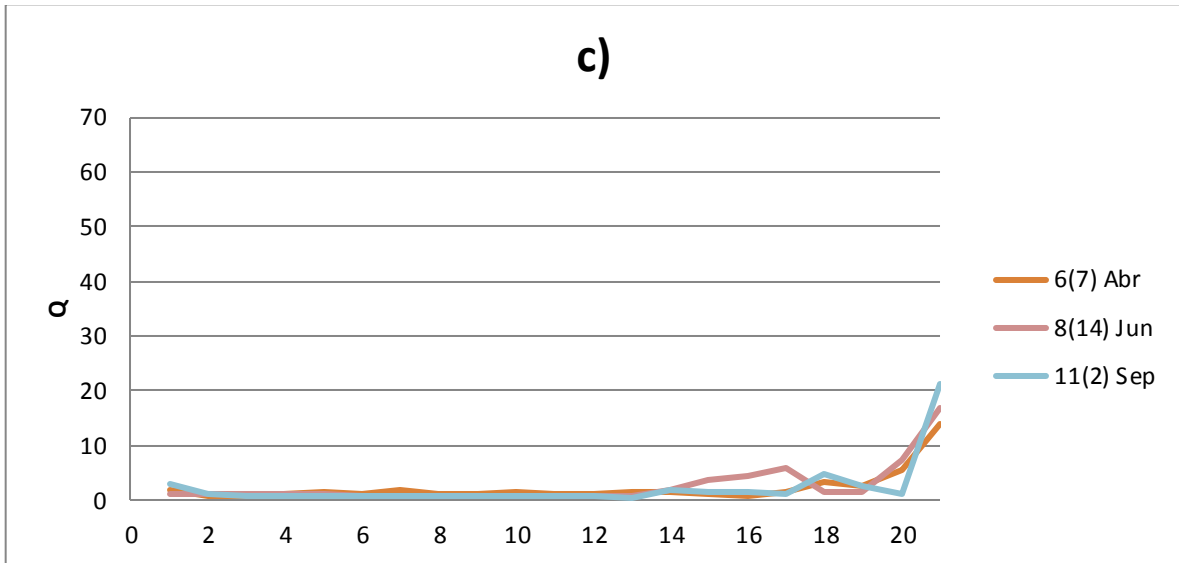


- b) La fluctuación de los caudales alcanza valores superiores a los $15\text{m}^3/\text{s}$, concentrándose principalmente en el rango entre los 5 y $10\text{m}^3/\text{s}$. Para estos eventos, se observa 3 claros ascensos a lo largo de las 3 semanas, antes de iniciar el de la crecida.

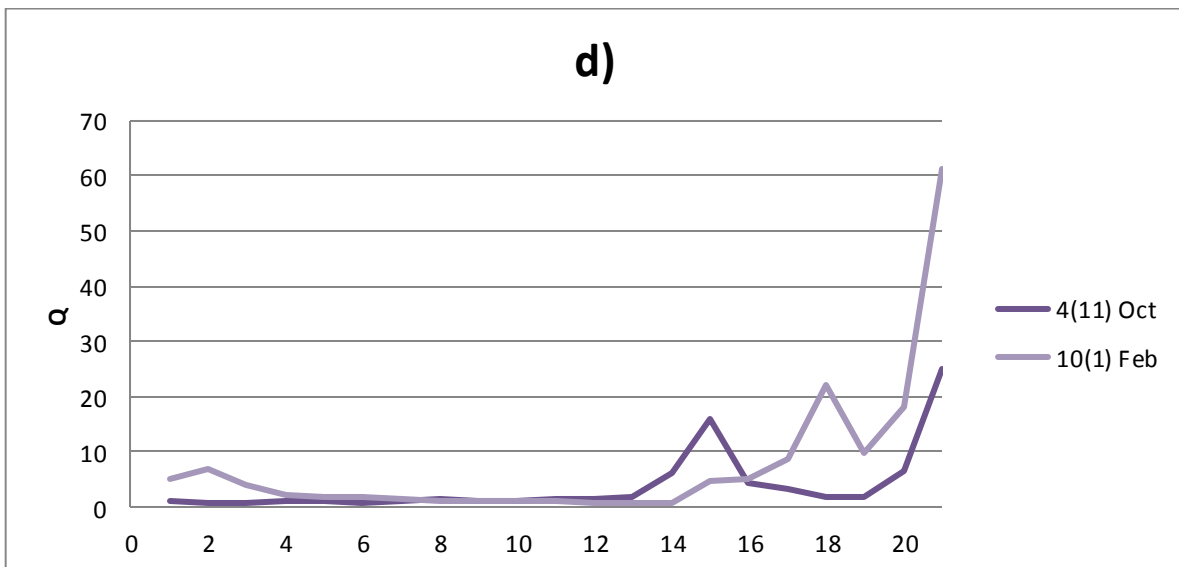




c) El caudal se mantiene por debajo de los $2\text{m}^3/\text{s}$ hasta una semana previo a la crecida, y empieza a fluctuar hasta alrededor de los $5\text{m}^3/\text{s}$ durante la última semana.

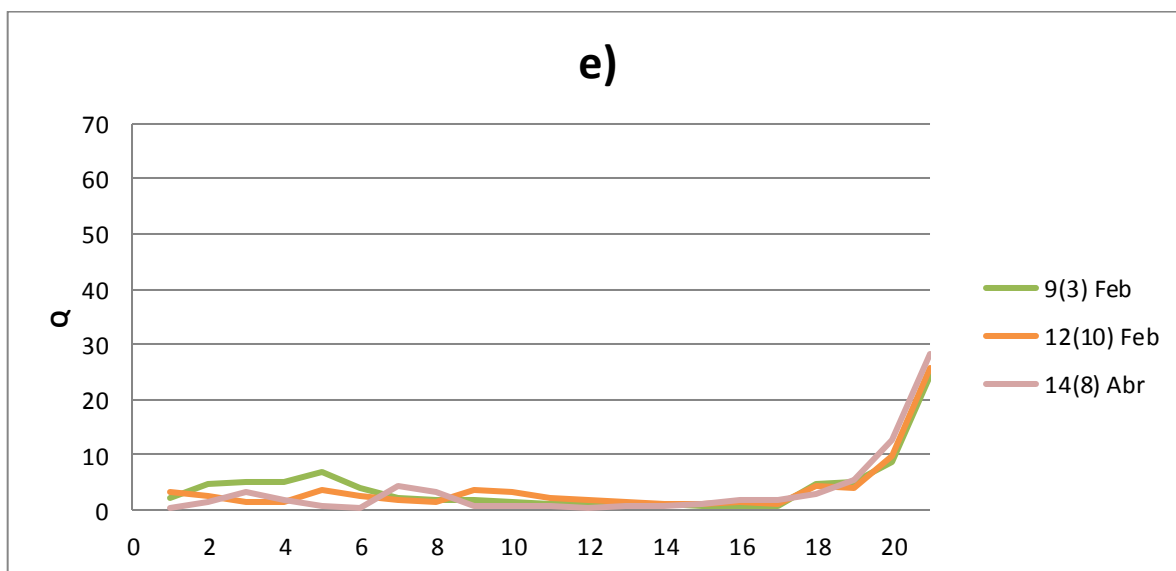


d) Al igual que el grupo anterior, el caudal se mantiene debajo de los $2\text{m}^3/\text{s}$ hasta una semana antes de la crecida, sin embargo, a partir de este día estos eventos fluctúan hasta valores comprendidos entre 15 y $20\text{m}^3/\text{s}$ antes de iniciar la crecida.





e) En este grupo los caudales fluctúan hasta los 3 y 5m³/s 3 semanas previas a la crecida, durante una semana; descienden durante la siguiente semana y 4 días antes de la crecida inician un progresivo ascenso.



En definitiva, se observa que un valor de 5m³/s que se mantenga durante varios días enciende una alerta, puesto que:

- En general casi todos los eventos, excepto dos, se mantienen la mayor parte del tiempo muy por debajo de los 5m³/s. En 6 de los 14 casos estudiados el caudal se mantiene bordeando los 5m³/s durante al menos 6 días, y en dos de estos casos, durante las 3 semanas previas a la crecida. 4 eventos superaron los 5m³/s solamente durante una o dos ocasiones en los días anteriores a la crecida.

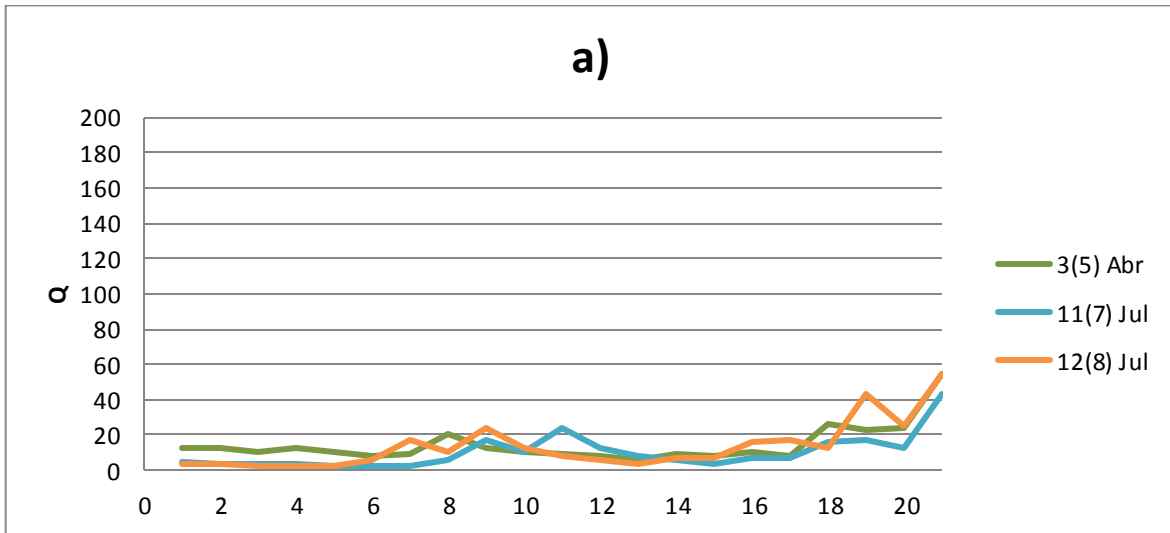
Las crecidas se presentan de manera repentina. En 7 de los 14 eventos, el ascenso inicia 1 o 2 días previos a la crecida, en 5 eventos lo hace 4 días previos, y solamente en 2 eventos lo hace con una semana de anterioridad.



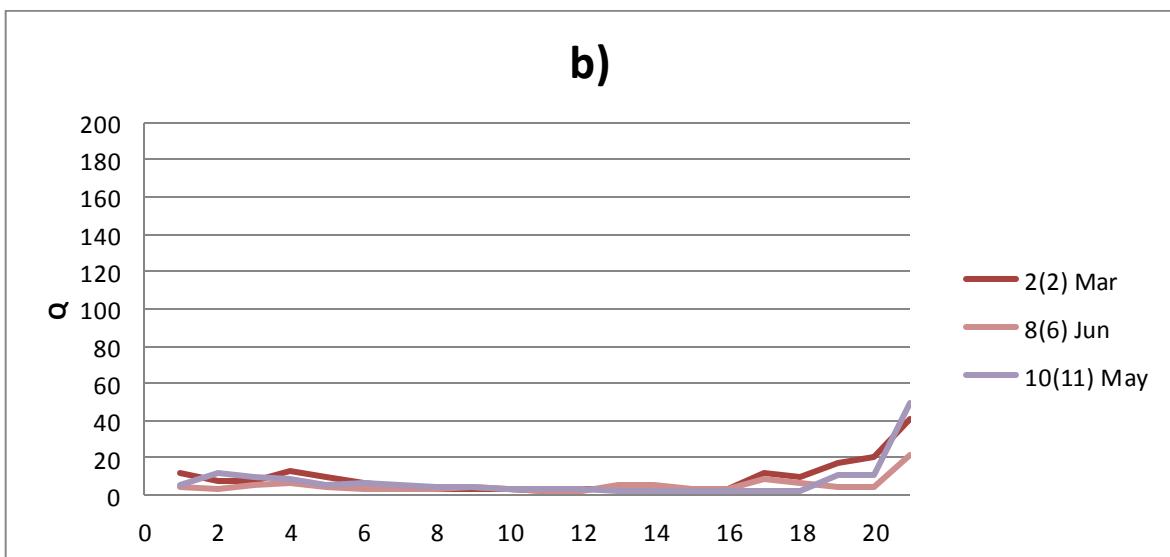
4.4.3. Yanuncay en Pucán:

Se han identificado 4 grupos de acuerdo al comportamiento del caudal:

- a) Dos semanas previas a la crecida los caudales fluctúan bordeando los $20\text{m}^3/\text{s}$, descienden por debajo de los $10\text{m}^3/\text{s}$ e inician el ascenso a la crecida con 4 días de anterioridad.

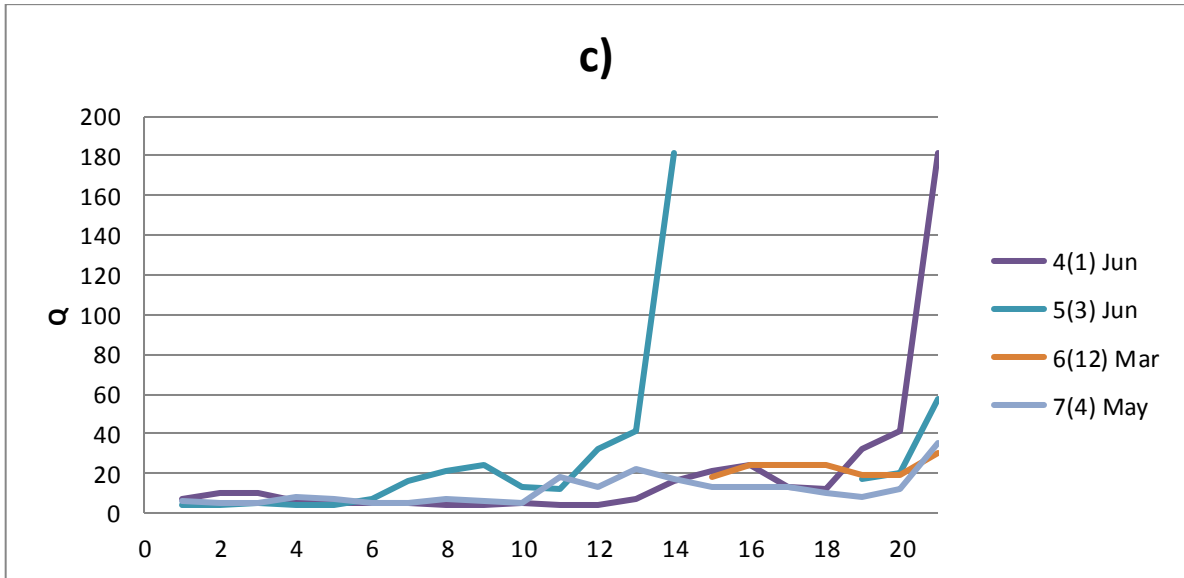


- b) Tres semanas previo a la crecida los caudales fluctúan alrededor de los $10\text{m}^3/\text{s}$, descienden y se mantienen por debajo de los $5\text{m}^3/\text{s}$, e inician el ascenso a la crecida de 3 a 5 días antes de la misma.

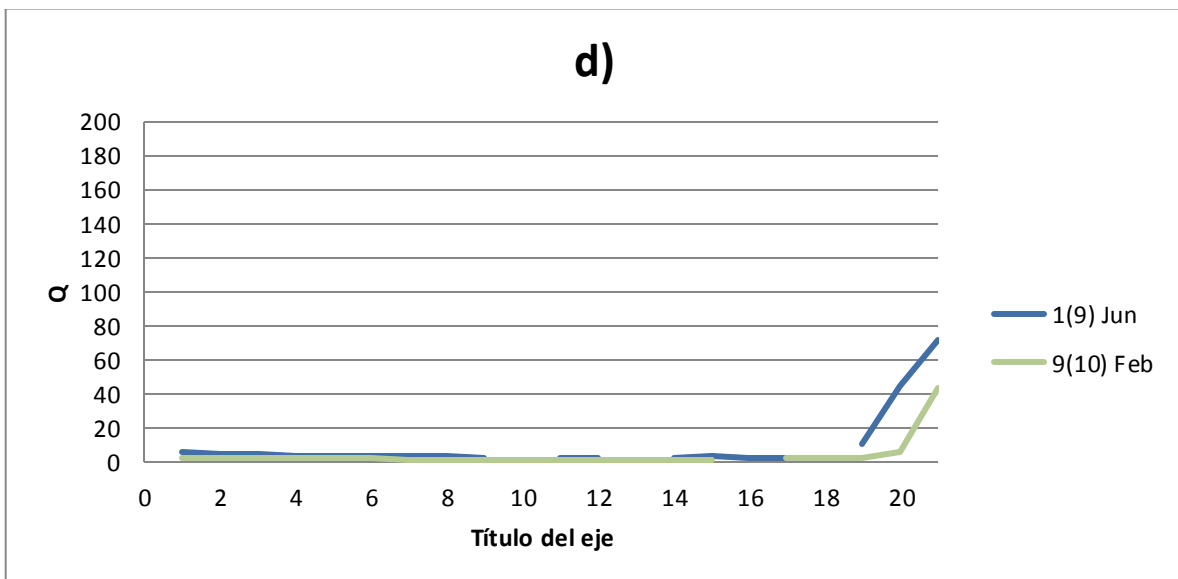




- c) Se trata de un caudal alto que bordea los $20\text{m}^3/\text{s}$ durante alrededor de una semana y enseguida asciende hacia la crecida.



- d) Estos eventos mantienen un caudal por debajo de los $2\text{m}^3/\text{s}$ durante casi 3 semanas, para posteriormente iniciar el ascenso 2 días antes de la crecida.





En definitiva, un valor de $20\text{m}^3/\text{s}$ que se mantiene durante varios días enciende una alerta, puesto que en 7 de los 12 casos estudiados el caudal se mantiene bordeando este valor durante al menos 6 hasta 10 días, durante las 3 semanas previas a la crecida; con excepción de un evento, estos se mantuvieron por encima de los $10\text{m}^3/\text{s}$ al menos las dos últimas semanas previas a la crecida. Cinco de estos 7 eventos no presentaron precipitaciones extraordinarias durante las 3 semanas previas a la crecida.

Las crecidas en este río se presentan de manera repentina. 5 de los 12 eventos se mantuvieron bordeando o debajo de los $5\text{m}^3/\text{s}$ durante más de dos semanas antes de iniciar el ascenso. Cuatro de estos 5 eventos presentan precipitaciones extraordinarias, especialmente los días más cercanos al evento.

4.5. Precipitación y Caudal

4.5.1. Matadero Sayausí:

Existe una tendencia creciente en la relación *Caudal promedio acumulado vs Volumen de Precipitación acumulada* ($QvsV$) que se evidencia, para 6 de los 13 eventos, a partir de los 10 días previos a la crecida. Tres días antes de la crecida, el gráfico adquiere una clara tendencia para 11 de los 13 eventos. Dos de los trece eventos (8 y 9) presentan una tendencia únicamente en los dos últimos valores, que sin embargo, coincide con tendencias presentadas en días anteriores. Se ha realizado una regresión lineal para todos los eventos en el número de días en que se evidenció una tendencia, mostrándose en la tabla 6 el coeficiente de determinación ' R^2 ' y la pendiente ' m ' obtenidos para cada caso. Para la tendencia de dos días el coeficiente de determinación R^2 es siempre igual a 1, por lo que se lo omite.



Tabla 13: Volumen de precipitación vs Caudal. Matadero Sayausí.

Evento	Q de crecida	Ranking	10 días		3 días		2 días	Observaciones
			R ²	m	R ²	M	m	
1	97,269	7			0,85	1,73	1,11	
2	79,776	13	0,99	0,45	1,00	0,49	0,50	
3	81,040	11	0,87	0,35	0,99	0,58	0,69	
4	88,908	9			1,00	1,42	1,51	
5	154,683	1	0,96	1,44	1,00	1,16	1,18	
6	130,632	2			0,99	1,58	1,68	Crecida que se presenta 6 días después de la anterior
7	101,278	5			0,99	1,08	1,00	
8	86,439	10	0,84	0,51			1,00	Crecida que se presenta 3 días después de la anterior
9	92,182	8	0,78	0,36			1,32	La pendiente de los 2 últimos días coincide con la que presentó el gráfico 6 días previo a la crecida, durante 3 días.
10	99,721	6			1,00	2,39	2,46	
11	114,333	4			1,00	1,84	1,90	
12	80,945	12			0,86	0,90	1,25	19 días previo a la crecida, durante 10 días, se presenta una pendiente de ascenso con m=0,75, luego el gráfico desciende
13	121,272	3	0,95	1,07	0,97	1,17	1,35	

Análisis:

Tomando en cuenta los valores de precipitación y caudal establecidos para la alerta, una pendiente $m=1$ en la línea de tendencia del gráfico QvsV durante al menos 3 días, incrementaría el riesgo de desbordamiento, puesto que:

- Únicamente en dos eventos la pendiente es menor a 1, indicando que el



caudal creció a menor velocidad que la precipitación. Ambos eventos, uno en febrero y el otro en octubre, presentaron las precipitaciones más altas registradas históricamente mientras que los caudales se ubican entre los más bajos registrados.

- En enero se presenta la pendiente más alta ($m=1,84$), sin embargo no es un dato concluyente debido a que es el único registrado en este mes.
- En febrero la precipitación se incrementa junto con el caudal ($m=1$).
- En abril los caudales aumentan en mayor medida que la precipitación ($m=1,25$), pero estos eventos no son los más altos registrados.
- En junio se registran los 3 eventos más fuertes en los que el caudal creció más rápidamente que la precipitación ($m=1,16$)
- En noviembre se registra un solo evento, en el que el caudal se incrementa más rápidamente que la precipitación ($m=1,11$).

4.5.2. Tarqui Cumbe

En esta estación las tendencias se presentan en un corto número de días, puesto que la mayoría de crecidas son repentinas o se presentan a pocos días de una crecida menor.

Se han trazado líneas de tendencia de 8 días, que abarcan a 4 de los 14 eventos, pero con coeficientes de determinación entre 0,8 y 0,9; la pendiente promedio en este caso es $m = 0,32$. Por otro lado, 10 de los 14 eventos presentan una tendencia a partir de 4 días antes de la crecida, con una pendiente promedio de $m=0,69$. Adicionalmente, 11 de los 14 eventos presentan una tendencia a partir de 3 días antes de la crecida, con una pendiente promedio de $m=0,85$. Finalmente, en los eventos 3 y 11, la crecida se presenta de manera repentina sin haber presentado tendencia previa alguna, por lo que se han tomado los valores correspondientes a los 2 días previos a la crecida (el día anterior y el día mismo de la crecida); el coeficiente de determinación R^2 es igual a 1 por lo que se lo omite, la pendiente promedio es



$m=1,58$. Cabe indicar que para todos los cálculos de promedio se ha descartado el evento 12 tratarse de un caudal extremo que ocurrió casi sin la presencia de lluvia.

Tabla 14: Volumen de precipitación vs Caudal. Tarqui Cumbe.

Evento	Q de crecida	Ranking	8 días		4 días		3 días		2 días	Observaciones
			R ²	m	R ²	m	R ²	m	m	
1	34,001	9			0,97	2,04	0,97	2,14	2,76	
2	33,188	12			0,96	0,51	0,99	0,58	0,62	
3	33,188	13							6,47	
4	33,593	11			1,00	1,14	1,00	1,14	1,11	
5	43,208	5	0,85	0,21	0,95	0,29	0,99	0,32	0,36	
6	35,660	7			0,96	0,32	0,99	0,36	0,33	
7	36,082	6	0,87	0,37	0,99	0,46	1,00	0,47	0,49	
8	33,188	14			0,99	0,68	1,00	0,71	0,72	
9	45,535	3	0,91	0,38	0,85	0,41	0,90	0,52	0,80	
10	80,304	1					0,95	1,08	1,39	
11	72,946	2							1,82	
12	33,822	10	0,88	14,87	0,93	13,02	0,93	12,46	10,54	Crecida sin presencia de lluvia
13	44,041	4							3,24	
14	35,086	8			0,97	0,40	1,00	0,46	0,48	

Análisis:

Tomando en cuenta los valores de precipitación y caudal analizados en los puntos anteriores, una pendiente $m=0,32$ en abril y mayo, y $m=1,11$ en septiembre y octubre, en la línea de tendencia del gráfico QvsV durante 3 días,



incrementaría el riesgo de desbordamiento, puesto que:

- En febrero no se presenta una clara tendencia. Uno de los eventos presenta una pendiente superior a 12, producto del ascenso de caudal junto con la precipitación históricamente más baja (no se corresponde a ninguna de las tendencias de precipitación identificadas). En este mes se presentaron las crecidas más altas históricamente (primera y tercera).
- En abril la precipitación se incrementa más rápidamente que el caudal ($m=0,32$), con excepción de uno de los 4 eventos, en el que la precipitación fue baja durante los 4 días previos a la crecida.
- En mayo los caudales aumentan en menor medida que la precipitación ($m=0,47$), con excepción del evento 13 que siendo la 4ta crecida más alta estuvo acompañada de precipitación baja.
- En junio no hay una tendencia concluyente. Fueron los caudales más bajos registrados, junto con una precipitación baja que no se enmarca en ninguna de las tendencias identificadas.
- En septiembre-octubre, el caudal se incrementa más rápidamente que la precipitación ($m=1,11$). En uno de estos eventos, el segundo más fuerte, la precipitación fue tan baja que no se enmarca dentro de ninguna de las tendencias identificadas.

4.5.3. Yanuncay en Pucán

Al igual que en la estación Tarqui Cumbe, la identificación de tendencias en el gráfico *Caudal promedio acumulado vs Volumen de Precipitación acumulada* se ha dificultado debido a que las crecidas se presentan repentinamente, o pocos días después de una crecida menor. Se han trazado líneas de tendencia de 7 días, que abarcan a 4 de los 12 eventos y cuya pendiente promedio es $m=0,92$. Ocho de los 12 eventos evidencian una tendencia durante los 3 días previos a la crecida, con pendiente promedio $m=1,18$ (descartando el evento 4 por presentar valores extremos). Cuatro de los doce eventos presentan una



tendencia únicamente durante los 2 días anteriores a la crecida, por lo que se ha evaluado este periodo; el coeficiente de determinación R^2 es 1 para todos los casos por lo que se lo omite en la tabla 11, la pendiente promedio es $m=1,70$ (descartando los evento 4 y 12 por presentar valores extremos).

Tabla 15: Volumen de precipitación vs Caudal. Yanuncay en Pucán.

Evento	Q de crecida	Ranking	7 días		3 días		2 días	Observaciones
			R^2	m	R^2	m	m	
1	98,520	9	0,96	1,75	1,00	2,33	2,49	Un día sin datos de caudal
2	179,348	2	0,88	0,49	0,97	1,04	1,26	
3	118,457	5					2,26	Pendiente que coincide con otra presentada en días anteriores
4	197,740	1			0,89	6,03	8,76	
5	179,348	3			0,99	1,46	1,58	Sólo existen 3 días de datos
6	90,698	11			0,96	0,64	0,75	
7	123,637	4			0,87	0,73	1,19	
8	111,771	6	0,86	0,53	0,95	0,63	0,78	El ascenso inicia 1 día previo a la crecida
9	98,202	10					1,82	
10	90,698	11	0,87	0,90	0,96	1,41	1,68	
11	108,947	7					3,14	
12	100,808	8					57,68	Incremento de caudal sin presencia de lluvia

Análisis:

De la tabla 8 se desprende que para el río Yanuncay el gráfico QvsV toma una tendencia únicamente los dos últimos días previos a la crecida, con una pendiente superior a 1,19:



- Únicamente en dos eventos la pendiente es menor a 1, indicando que el caudal creció a menor velocidad que la precipitación. El evento en junio presentó un incremento de precipitación únicamente durante los 2 días previos a la crecida, junto con los caudales promediados históricamente más bajos; mientras que el evento en marzo presentó un caudal alto desde 6 días previos a la crecida que se mantuvo constante en lugar de ascender.
- En febrero, marzo y abril la pendiente de $m=1,26$ representa a tres eventos, indicando que el caudal creció más rápidamente que la precipitación; por otro lado una pendiente $m=0,75$ (mencionada en el punto anterior) representa a la menor de las crecidas registrada en estos meses, indicando el efecto contrario. Todos estos eventos pertenecen a la tercera tendencia de precipitación, es decir una acumulación durante los 4 días previos a la crecida.
- En mayo la pendiente de los eventos es superior a uno ($m=1,19$), es decir que el caudal se incrementa más rápidamente que la precipitación. Estos eventos pertenecen a la tercera tendencia de precipitación, es decir una acumulación durante los 4 días previos a la crecida.
- En junio y julio, 4 de los 5 eventos registrados presenta una pendiente superior a 2,4, lo cual indicaría que los caudales aumentan en mayor medida que la precipitación. Algunos de estos eventos alcanzan valores tan altos como 8 y 57, significando que el incremento del caudal sucedió sin la presencia de precipitación; en un caso debido a que se trató de la crecida más fuerte, en la que poco influyó la precipitación, y en el otro caso debido a que la crecida se presentó dos días después de la anterior. Los eventos con mayor pendiente presentaron acumulación de precipitación durante 10 y 16 días.

En definitiva, se determina que las pendientes del gráfico *Caudal promedio acumulado vs Volumen de Precipitación acumulada (QvsV)*, son mayores a 1



en los ríos Tomebamba y Yanuncay, y menores a este valor en el río Tarqui. Esto evidencia que en el primer caso los caudales se incrementan más rápidamente que la precipitación, mientras que en el segundo caso sucede lo contrario. Sin embargo esta pendiente no puede ser utilizada como indicador de severidad, puesto que una pendiente alta puede ser producto de un descenso en la precipitación y no necesariamente de un incremento de caudal. En general, las crecidas más fuertes en las 3 estaciones se presentaron con una pendiente ligeramente superior a 1.

4.6. Relación del caudal pico de la crecida con respecto al caudal con el que inició el ascenso de la misma.

El río Tarqui concentra el mayor porcentaje de eventos (82,86%) en el rango de valores de 11 a 30, mientras que para el caso del río Yanuncay el 78,57% de valores se concentran en el rango de 0 a 20. En el caso del río Tomebamba, no existe una clara concentración de valores en un solo rango, sino que éstos se distribuyen en los rangos desde menores a 10 hasta mayores de 40.

Tabla 16: Caudal pico/Caudal bajo.

Rango Q_p/Q_b	Matadero Sayausí		Tarqui Cumbe		Yanuncay en Pucán	
	# Eventos	Porcentaje	# Eventos	Porcentaje	# Eventos	Porcentaje
0-10	4	14,29%	2	5,71%	11	39,29%
11-20	11	39,29%	19	54,29%	11	39,29%
21-30	5	17,86%	10	28,57%	3	10,71%
31-40	4	14,29%	3	8,57%	1	3,57%
>40	4	14,29%	1	2,86%	2	7,14%
Total	28		35		28	

En la tabla 10 se observa que el río Tomebamba presenta en promedio la relación más alta de caudal pico sobre caudal de inicio de la crecida (Q_p/Q_b): 26,78, frente a un valor de 20,73 del río Tarqui, y 15,23 del río Yanuncay. El valor mínimo de (Q_p/Q_b) es menor para el caso del río Yanuncay (5,04) que



para el río Tomebamba (7,31) y el río Tarqui (9,06); mientras que el valor máximo de (Q_p/Q_b) es mayor para el río Tomebamba (106,51) que para los ríos Tarqui (92,69) y Yanuncay (49,88). Estos valores, mayores para los ríos Tarqui y Yanuncay, serían producto de la cualidad de repentinas de las crecidas en estos ríos; mientras que en el río Tomebamba los valores de la relación Q_p/Q_b más altos son reflejo de las crecidas que toman en promedio más de cuatro días en configurarse.

Tabla 17: Caudal pico/Caudal bajo. Valores representativos.

	Matadero Sayausí	Tarqui Cumbe	Yanuncay en Pucán
Mínimo	7,31	9,059	5,040
Máximo	106,51	92,692	49,883
Promedio	26,78	20,729	15,232

En general, como se ha evidenciado en el ranking de caudales promediados diariamente para las 3 semanas previas a la crecida, y en los hidrogramas respectivos, las crecidas del río Tomebamba son menos repentinas que en los ríos Tarqui y Yanuncay; esto se verifica además en el tiempo que han tardado en formarse las crecidas contenidas en el umbral 3, en promedio de 2 días para los ríos Tarqui y Yanuncay, y 4 días en el río Tomebamba, como se indica en la tabla 11.

	Matadero S.	Tarqui Cumbe	Yanuncay en P.
Promedio	4,64	2,26	2,06
Moda	8	2	1
Máximo	14	12	7
Mínimo	0,04 (1 hora)	0,21 (5 horas)	0,10 (2,5 horas)
Crecida más alta	9	2,71	1

Tabla 18: Tiempo (en días) que tarda en formarse la crecida.



5. Conclusiones

La presente investigación tuvo por objetivo estudiar las condiciones hidrometeorológicas, de caudal y precipitación, que indujeron la ocurrencia de crecidas fuertes en los ríos Tomebamba, Tarqui y Yanuncay entre los años 1997 y 2011. Para este propósito se estudió un total de 39 eventos de crecida.

Se determinó la pertinencia de las estaciones pluviométricas y de descarga colocadas en las cuencas de estos 3 ríos, para describir la configuración de las crecidas, las cuales se enmarcan dentro de alguna de las tendencias de precipitación y de caudal posteriormente identificadas.

Se encontró que las crecidas más fuertes no correspondieron a precipitaciones extraordinarias registradas por las estaciones pluviográficas de las cuencas, de lo cual se deduce la necesidad de equipar las zonas altas y medias de las cuencas.

La determinación de los volúmenes acumulados de precipitación que han desencadenado crecidas, así como del tiempo (en días) que tardaron en acumularse, permitieron identificar 2 o 3 tendencias de lluvia para cada estación en estudio:

- Río Tomebamba. Tendencia 1: 120mm de precipitación acumulada durante 21 días; Tendencia 2: 91mm acumulados en 14 días; y Tendencia 3: 63mm acumulados en 7 días.
- Río Tarqui. Tendencia 1: 124mm de precipitación acumulada durante 21 días; y Tendencia 2: 70mm acumulados en 7 días.
- Río Yanuncay. Tendencia 1: 93mm de precipitación acumulada durante 16 días; Tendencia 2: 65mm acumulados en 10 días; y Tendencia 3: 37mm acumulados en 4 días.

Con esta información se han propuesto ventanas móviles con determinados



volúmenes de precipitación acumulada sobre los cuales se inician situaciones de riesgo, y que permitirán, en lo futuro, alertar la posible ocurrencia de crecidas.

A través del estudio del comportamiento de los caudales durante las 3 semanas previas a la crecida se determinaron las conductas típicas de los 3 ríos, así como los caudales que implican riesgo. Los ríos Tomebamba y Tarqui presentan 5 conductas típicas, mientras que el Yanuncay 4. Adicionalmente se identificaron los caudales regulares y aquéllos que produjeron desbordamientos en cada río. Los caudales que produjeron desbordamientos fueron: $179,35\text{m}^3/\text{s}$ para el río Yanuncay y $33,59\text{ m}^3/\text{s}$ para el río Tarqui; mientras que un caudal de $154,68\text{m}^3/\text{s}$ en el río Tomebamba despertó la alerta del Cuerpo de Bomberos en junio de 2007 según la prensa, pero sin registrarse desbordamientos.

El análisis conjunto de los valores de precipitación y caudal de cada evento, permitió determinar el comportamiento de estos dos parámetros previo a la ocurrencia de una crecida en los 3 ríos, estableciendo pendientes mínimas de la gráfica *Caudal promedio acumulado vs precipitación acumulada*, que junto a los resultados obtenidos para la precipitación y el caudal individualmente, pueden utilizarse como señales de alerta de la posible ocurrencia de una crecida.

No se identificó una relación clara del comportamiento de las crecidas con el mes de ocurrencia en las estaciones estudiadas, es decir, las crecidas se produjeron en varios meses del año. Así, para el río Tomebamba se determina que son meses de riesgo: Febrero, Abril y Junio, en los que se presentaron 10 de los 13 eventos estudiados. En el río Yanuncay todas las crecidas que superan el umbral dos se presentaron en el primer semestre del año (todos los meses desde febrero hasta julio), y las más fuertes en el mes de junio. En el río Tarqui de 12 de las 14 crecidas más fuertes se presentaron en el primer semestre del año, durante los meses de febrero, abril y mayo principalmente. El hecho de que el peligro se pueda presentar en cualquier mes, evidencia la



necesidad de contar con un sistema de alerta temprana para posibles crecidas.

Estudios futuros

Para corroborar los resultados obtenidos, en futuras investigaciones se deberá analizar si situaciones similares de precipitación y caudal se produjeron durante periodos distintos al utilizado en esta investigación, sin la generación de altas descargas.

Para la aplicación de los parámetros identificados en esta investigación se deberá desarrollar un script en el que, al ingresar los datos en tiempo real, se realicen las siguientes funciones:

- Acumular la precipitación registrada en las ventanas móviles propuestas para cada río. En caso de superarse los valores límite, emitir una señal de alerta para cada tendencia identificada en los 3 ríos (es posible que una precipitación supere los valores límite de más de una de las tendencias, por lo que se emitiría más de una alerta).
- Determinar la relación *Caudal promedio acumulado vs Volumen de precipitación acumulada* en el número mínimo de días propuesto para cada río, y emitir una señal de alerta en caso de superarse las pendientes identificadas para cada caso.

Este script puede ser ejecutado en herramientas informáticas como Matlab o Python.

Debido a que las estaciones de descarga registran un dato solamente cuando hay variación en el caudal, los días que no registran datos se deben a la ocurrencia de años secos (1998, 1999, 2000), y/o a la estabilidad de los caudales en estos ríos. Por lo expuesto, resultaría de gran interés un estudio de la capacidad de regulación natural de estas 3 cuencas, dado el indicio de estabilidad de sus cauces.



BIBLIOGRAFÍA

- 1.- Burn, D. H., & Hag Elnur, M. A. (2002). Detection of hydrologic trends and variability. *Journal of hydrology*, 255(1), 107-122.
- 2.- Celleri, R., Willems, P., Buytaert, W., & Feyen, J. (2007). Space–time rainfall variability in the Paute Basin, Ecuadorian Andes. *Hydrological processes*, 21(24), 3316-3327.
- 3.- CEPAL, Unidad de Desastres (2010). Desastres y desarrollo: el impacto en 2010, cifras preliminares. [Fecha de consulta: 6 de diciembre 2013]. Disponible en:
http://www.cepal.org/desastres/noticias/noticias/2/42102/Desastres2010_WEB.pdf.
- 4.- Espinoza Villar, J. C., Ronchail, J., Guyot, J. L., Cochonneau, G., Naziano, F., Lavado, W., ... & Vauchel, P. (2009). Spatio-temporal rainfall variability in the Amazon basin countries (Brazil, Peru, Bolivia, Colombia, and Ecuador). *International Journal of Climatology*, 29(11), 1574-1594.
- 5.- He, H., Zhou, J., Peart, M. R., Chen, J., & Zhang, Q. (2012). Sensitivity of hydrogeomorphological hazards in the Qinling Mountains, China. *Quaternary International*, 282, 37-47.
- 6.- Koutroulis, A. G., Tsanis, I. K., & Daliakopoulos, I. N. (2010). Seasonality of floods and their hydrometeorologic characteristics in the island of Crete. *Journal of Hydrology*, 394(1), 90-100.
- 7.- Kundzewicz, Z. W., & Robson, A. J. (2004). Change detection in hydrological records—a review of the methodology/Revue méthodologique de la détection de changements dans les chroniques hydrologiques. *Hydrological Sciences Journal*, 49(1), 7-19.
- 8.- Lavado Casimiro, W. S., Ronchail, J., Labat, D., Espinoza, J. C., & Guyot, J. L. (2012). Basin-scale analysis of rainfall and runoff in Peru (1969–2004): Pacific, Titicaca and Amazonas drainages. *Hydrological Sciences Journal*, 57(4), 625-642.
- 9.- Liu, J., Cheng, Z., & Li, Q. (2013). Meteorological Conditions for Frequent Debris Flows from Guxiang Glacier, Mount Nyenchen Tanglha, China. *Mountain*



Research and Development, **33(1)**, 95-102.

10.- Norbiato, D., Borga, M., Sangati, M., & Zanon, F. (2007). Regional frequency analysis of extreme precipitation in the eastern Italian Alps and the August 29, 2003 flash flood. *Journal of hydrology*, **345(3)**, 149-166.

11.- Nuñez Cobo, J., & Verbist, K. (2011). *Guía metodológica para la aplicación del Análisis Regional de Frecuencia de Sequías basado en L-momentos y resultados de aplicación en América Latina*. Programa Hidrológico Internacional (PHI) de la Oficina Regional de Ciencia para América Latina y el Caribe de la UNESCO. 87 págs.

12.- Parajka, J., Kohnová, S., Bálint, G., Barbuc, M., Borga, M., Claps, P., ... & Blöschl, G. (2010). Seasonal characteristics of flood regimes across the Alpine–Carpathian range. *Journal of hydrology*, **394(1)**, 78-89.

13.- Schaeffli, B., Maraun, D., & Holschneider, M. (2007). What drives high flow events in the Swiss Alps? Recent developments in wavelet spectral analysis and their application to hydrology. *Advances in Water Resources*, **30(12)**, 2511-2525.

14.- Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo – Senplades (2013). Plan Nacional para el Buen Vivir 2013-2017, [1era ed] Quito –Ecuador, 600 págs.

15.- Segovia, M. A., & Hang, M. V. (2009). Estimación del Valor del Número de Curva (CN) a Través de Imágenes Satelitales Landsat5-tm.

16.- Sociedad Española de Ciencias Forestales. Diccionario Forestal. Ediciones Mundiprensa. Barcelona 2005.

17.- Vargas, J. E. (2002). *Políticas públicas para la reducción de la vulnerabilidad frente a los desastres naturales y socio-naturales* (Vol. 50). United Nations Publications, 85 págs.

18.- Zhang, Y., Smith, J. A., & Baeck, M. L. (2001). The hydrology and hydrometeorology of extreme floods in the Great Plains of eastern Nebraska. *Advances in water resources*, **24(9)**, 1037-1049.