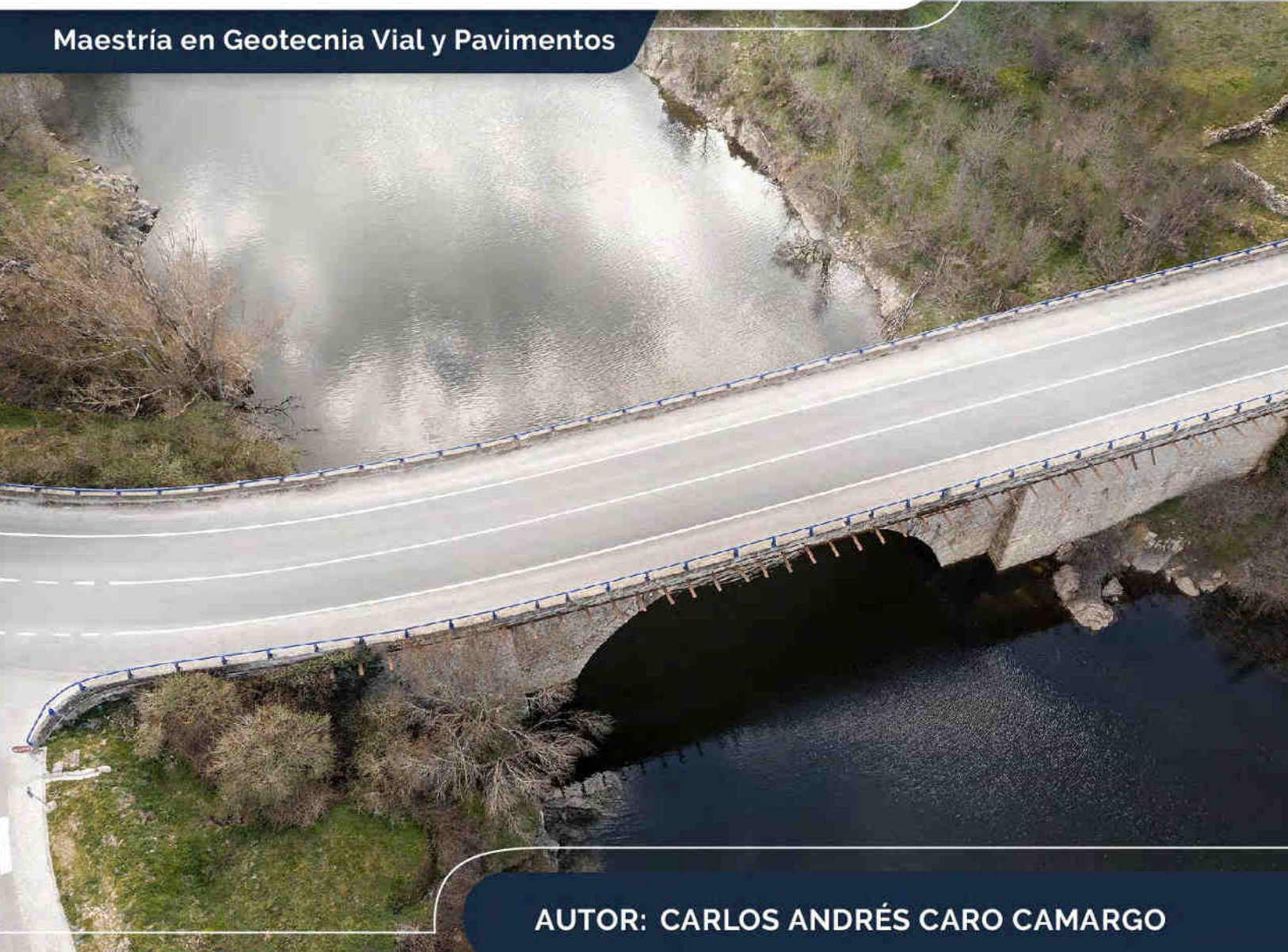


MODELACIÓN HIDROLÓGICA DISTRIBUIDA EN VÍAS

Maestría en Geotecnia Vial y Pavimentos



AUTOR: CARLOS ANDRÉS CARO CAMARGO

Modelación Hidrológica Distribuida en Vías
Carlos Andrés Caro Camargo

Ediciones USTA Tunja, 2024

111 páginas: tamaño 21,5 x 24 cm

El módulo brinda las herramientas necesarias para abordar la representación y cuantificación de caudales de aportación a zonas viales, más idónea según el tipo de proyecto a desarrollarse, desde el diseño y estudio hidrológico, análisis de información contenida en él, y formas de presentación en función al objetivo de impacto en el proyecto vial, siempre según el tipo de información de entrada disponible. El contexto de las herramientas sugeridas está enmarcado en la temática principal de hidrología agregada, semidistribuida e hidrología distribuida. Sin embargo, dichas herramientas o insumos pueden ser aplicados dependiendo del uso u objetivo de cada uno de los proyectos o casos específicos.



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
SECCIONAL TUNJA

Fray Fernando MANCIPE GIRALDO, O.P.
Rector Seccional

Fray José Arturo RESTREPO RESTREPO, O.P.
Vicerrector Administrativo y Financiero

Fray José Gregorio HERNÁNDEZ TARAZONA, O.P.
Vicerrector Académico

Fray Sergio Andrés Mendoza Vargas O.P.
Decano de División de Ingenierías y Arquitectura

Óscar David Rojas Cely
Director Posgrados División de Ingenierías y Arquitectura

Brigid Hiomara Pacheco García
Decana de Facultad de Ingeniería Civil

Liliana Mendivelso Melo
Directora Campus Virtual

Primera edición, 2024
ISBN 978-628-7747-07-4 (digital)

Facultad de Ingeniería Civil
Maestría en Geotecnia Vial y Pavimentos
Modelación Hidrológica distribuida en Vías

© Autor: Carlos Andrés Caro Camargo

© Ediciones USTA Tunja

Av. Universitaria n.º 45 - 202
Campus Avenida Universitaria
Edificio Santo Domingo de Guzmán

Calle 19 No. 11 - 64, Tunja, Boyacá, Colombia
PBX: (8) 744 0404 Ext. 5980
www.santototunja.edu.co

Preparación editorial

Coordinación editorial: Campus Virtual
Corrección de estilo y lectura de pruebas: Fray Angel María Beltrán O.P.

Diseño de carátula y diagramación

Departamento de Comunicaciones - Campus Virtual
SANTOTO Tunja

Publicado en Colombia - Published in Colombia



Material publicado de acuerdo con los términos de la licencia Creative Commons

AttributionNonCommercial-NoDerivatives 4.0 International (CC BY-NC-ND 4.0). Usted es libre de copiar o redistribuir el material en cualquier medio o formato, siempre y cuando dé los créditos apropiadamente, no lo haga con fines comerciales y no realice obras derivadas

CONTENIDO

CAPÍTULO GENERALIDADES

Introducción del espacio académico.....	7
Presentación de los capítulos	10

CAPÍTULO 1. CONCEPTOS DE DRENAJE VIAL COMO RESPUESTA A LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA

1.1 Introducción.....	13
1.2 Resumen	14
1.3 Clima en Colombia.....	16
1.4 Influencia del cambio climático en la generación de infraestructura	18
1.5 Concepto de prevención vial desde la hidrología y cambio climático.....	26
1.5.1 Ejemplo de aplicación de prevención vial ante efectos climáticos extremos.....	28

CAPÍTULO 2. CONCEPTOS HIDROLÓGICOS

2.1 Introducción	33
2.2 Resumen	34
2.3 Balance hídrico.....	35
2.3.1 Cálculo del balance hídrico	36
2.3.2 Ejemplo de cálculo del balance hídrico	38
2.4 Morfometría de cuenca	39
2.4.1 Indicadores de eficiencia de una Cuenca	41
2.5 Precipitación vs intensidad de precipitación	47
2.6 Precipitación areal	48
2.7 Lluvia de Proyecto	53
2.8 Ejemplo método de bloques alternados	55



2.9 Modelos agregados y continuos	58
2.9.1 Modelos agregados.....	59
2.9.2 Modelo continuo, como modelo semi distribuido	69

CAPÍTULO 3. GESTIÓN DEL RIESGO VIAL Y APLICACIÓN DE MODELOS HIDROLÓGICOS SEMIDISTRIBUIDOS

3.1 Introducción	77
3.2 Resumen.....	78
3.3 Gestión del riesgo por inundación y sus implicaciones en infraestructura vial	80
3.4 Implicaciones de la aplicación de la gestión del riesgo en el diseño vial.....	82

CAPÍTULO 4. MODELACIÓN DISTRIBUIDA Y E INSUMOS VIALES

4.1 Introducción.....	89
4.2 Resumen.....	90
4.3 Concepto de transporte	91
4.4 Caracterización de flujo en modelización distribuida para aportaciones viales.....	94
Glosario	102
Bibliografía	108







MODELACIÓN HIDROLÓGICA DISTRIBUIDA
EN VÍAS

CAPÍTULO

GENERALIDADES

CAPÍTULO GENERALIDADES

Introducción del espacio académico

El hombre ha basado el crecimiento económico y su bienestar social en torno al aprovechamiento de los recursos naturales, la agricultura, y el respaldo ambiental en torno a sus principales necesidades. En ese sentido, el recurso agua, ha servido no solamente como vital máximo de supervivencia, sino como un recurso de maximización de otros recursos, como el alimenticio, ecosistémico energético, paisajístico o bélico. Pero no solamente el agua se ha visualizado como recurso; a través de la historia ha sufrido de catástrofes y eventos reconocidos como amenaza, allí entran las avalanchas, inundaciones, tsunamis o fenómenos torrenciales o de remoción en masa. El entendimiento del agua como recurso y como amenaza, es un punto de partida para garantizar el concepto de aprovechamiento y gestión del recurso hídrico.

La gestión y administración hídrica significa aprovechar el agua como recurso en todo sentido, pero también protegernos del agua como amenaza. Debido a ello, uno de los insumos principales en la historia, respecto al entendimiento del agua, es poderla cuantificar. Evaluar, determinar o pronosticar caudales se ha convertido en una herramienta fundamental en la historia del desarrollo humano, y ello permitió a grandes civilizaciones convertirse en imperios dominadores en la antigüedad y a grandes potencias mundiales de la actualidad, gestionar adecuadamente sus recursos naturales para crecimiento propio.

Sin embargo, el buen uso del agua en el planeta no ha sido precisamente el sello distintivo de las diferentes sociedades a través del tiempo, y en vez de ello, la hemos mal utilizado provocando desbalances hidrológicos sectoriales que han producido daños graves a los ecosistemas, y a la naturaleza en general. A pesar de gozar con abundantes recursos hídricos, el planeta percibe un déficit hídrico en buena parte de los países del mundo, evidenciando graves falencias en cuanto al entendimiento del agua, desde una visión de sostenibilidad y buena gestión del recurso, que con el tiempo ha generado inequidad hídrica y escasez evidente en algunas regiones del mundo.

Debido a toda esta clase de problemas, la ONU (Organización de las Naciones Unidas), proyectó en el año 2000 una serie de medidas en las que pidió a todos los países del mundo tratar de aplicarlas al interior de sus territorios, y tenían que ver con la planificación y gasto consiente de los recursos naturales incluido el recurso hídrico, tomando como referencia la preocupante realidad de sobre explotación de los mismos hasta ese entonces. Dicho plan de herramientas, validaciones y normas, se conocieron como los objetivos del milenio, asumiendo que eran medibles, que podían lograr calificar el nivel de compromiso de cada nación respecto a dichas necesidades y compromisos. Sin embargo, para el año 2015, se mostraron algunos resultados preliminares del plan, y el resultado no fue muy alentador. Debido a ello, La ONU, acotó los iniciales objetivos del milenio a través de un nuevo documento que involucraba la optimización en el uso de los recursos, pero teniendo en cuenta el sello y concepto de sostenibilidad, naciendo así los objetivos de sostenibilidad (2015).

De los objetivos de sostenibilidad de la ONU, posteriormente muchos de los países incluida Colombia, legislaron nuevas leyes y decretos, como la Ley de gestión del riesgo, en el caso colombiano, que permitió garantizar el buen manejo de aguas, de manera sostenible y diseños respecto a amenazas como la inundabilidad o peligros asociados.

Hoy día, en Colombia, no hay una sola obra de infraestructura que no haya tenido que demandar o proyectar, en el sentido de planes de manejo de aguas que controlan los municipios y los departamentos.



En todo este proceso, dado a través de la historia, la solución a dichos problemas, en este caso hídricas, con sus respectivas soluciones, se realizó en principio a través de técnicas que se basaban en ensayo y error, la gran mayoría, pero que dependiendo del tipo de problema podían ir avanzando a técnicas un poco más depuradas o procesos específicos para búsqueda de soluciones. ¿Siempre dichas soluciones respondían a las verdaderas necesidades?, sólo pudo verse una verdadera evidencia de cambio, cuando se normalizaron todos los procedimientos, en el caso colombiano, a través de decretos o leyes. Lo referente a toda esa generación de soluciones frente a esas problemáticas básicas del recurso agua, complejas a través de la historia, requirieron técnicas y maneras o procedimientos que escalaban los problemas reales a través de representaciones físicas o conceptuales. Para lograr las soluciones, dichos mecanismos, representaciones y formas dieron lugar al concepto de modelización. Y dependiendo de las diferentes problemáticas surgieron los tipos de modelización, la cual ha sido una de las principales herramientas modernas de desarrollo de la humanidad, a través de ella hemos ejemplificado y representado de mejor manera los diferentes procesos físicos de la naturaleza, para asociarlos a distintos objetivos de desarrollo, tanto para el aprovechamiento en este caso específico, del recurso hídrico propiamente o como amenaza.

A su vez, la modelización ha ido evolucionando en tipos presentes en la forma de representación de la realidad, dependiendo de la calidad de dicha representación desde la óptica de cada una de las variables de caracterización y su grado de exactitud respecto a la realidad. Hasta hace un par de décadas, tener representación topográfica de una cuenca mediante un modelo de elevación digital satelital a una escala menor a 100 metros era imposible. Hoy, la disponibilidad gratuita de la misma a una resolución de 3 metros es una realidad, así como los propios mapas de cobertura, uso del suelo o incluso lluvia, lo que ha permitido el uso cada vez más extendido de los modelos distribuidos de alta resolución.

Uno de mayor aplicación de los modelos hidrodinámicos e hidrológicos distribuidos y semi distribuidos dentro del capo de la representación de comportamiento del recurso hídrico, lo es el drenaje vial, donde la determinación de zonas de aportación a los corredores viales urbanos o rurales a través de la representación y caracterización

de cuencas o subcuencas aportantes es un insumo fundamental. La modelización hidrológica distribuida y semidistribuida, es muy importante en la generación de obras viales con adecuadas obras de drenaje que minimizan los efectos de peligrosidad y riesgo sobre las vías y carreteras a nivel nacional.

Presentación de los capítulos

El módulo brinda las herramientas necesarias para abordar la representación y cuantificación de caudales de aportación a zonas viales, más idónea según el tipo de proyecto a desarrollarse, desde el diseño y estudio hidrológico, análisis de información contenida en él, y formas de presentación en función al objetivo de impacto en el proyecto vial, siempre según el tipo de información de entrada disponible. El contexto de las herramientas sugeridas está enmarcado en la temática principal de hidrología agregada, semidistribuida e hidrología distribuida. Sin embargo, dichas herramientas o insumos pueden ser aplicados dependiendo del uso u objetivo de cada uno de los proyectos o casos específicos.

El capítulo 1, detalla la problemática general de Colombia y el mundo en relación con cambio climático y acentuación de extremos, lo que ha conllevado a la toma de medidas especiales, de tipo legal y procedimental en el mundo y en nuestro país. Se enfatiza el concepto y dimensión en la importancia del drenaje de carreteras, como respuesta al tratamiento de dichos extremos climáticos, que pueden conducir a riesgos de tipo vial y de seguridad para los usuarios de las vías nacionales.

El capítulo 2, reúne los conceptos y metodologías hidrológicas necesarias como insumo a modelizaciones de tipo agregado, semi distribuido y distribuido en la identificación potencial de usos de la hidrología e hidrodinámica aportante a corredores y sectores de proyectos viales. En este, se comienzan a resaltar algunas diferencias entre los insumos y variables hidroclimatológicas necesarias, según el tipo de modelización a



emplear dependiendo de dichos usos, con el fin de identificar las principales bondades que pudieran llegar a tener las representaciones del clima, uso de la tierra, tipos de suelos, elevación digital o clima en general de las zonas aportantes.

El capítulo 3, expone los aspectos más destacados en referencia al análisis de situaciones de amenaza, peligrosidad y riesgo, en zonas de potencial vulnerabilidad por inundación o encharcamiento para proyectos viales. Se hace énfasis en la importancia de la jurisdicción del proyecto, aspectos legales en el caso colombiano y normas técnicas para aplicación de modelos hidrodinámicos para ajuste en escenarios de diseño urbano. Así mismo, se hace un énfasis especial y ejemplos paso a paso respecto al cómo abordar un problema de excesos en alturas de lámina de agua o velocidades específicas.

El capítulo 4, analiza la concepción, modelización y análisis de escenarios distribuidos con ejemplos paso a paso respecto a ejemplos con uso y aplicación de drenaje de carreteras. Se analiza tanto el preproceso como el postproceso de cada escenario, con la cuantificación respectiva de variables hidrológicas.



MODELACIÓN HIDROLÓGICA DISTRIBUIDA
EN VÍAS

CAPÍTULO 1

CONCEPTOS DE DRENAJE VIAL COMO RESPUESTA A LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA

CAPÍTULO 1. CONCEPTOS DE DRENAJE VIAL COMO RESPUESTA A LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA

1.1 Introducción

El drenaje vial y la variabilidad climática están estrechamente relacionados. Esta última se refiere a los cambios y fluctuaciones naturales del clima a corto plazo, mientras que el drenaje vial se refiere al sistema de recolección y evacuación del agua de lluvia en las vías y carreteras. La variabilidad climática puede tener un impacto significativo en el drenaje vial. Los eventos de lluvia intensa y prolongada pueden sobrecargar los sistemas de drenaje existentes, lo que puede llevar a inundaciones en las vías y carreteras. Además, los cambios en los patrones de lluvia debido a la variabilidad climática pueden alterar la cantidad y el flujo de agua que ingresa a los sistemas de drenaje (Maldonado, S, et al, 2012).

Para hacer frente a la variabilidad climática y sus efectos en el drenaje vial, es importante considerar medidas de adaptación. Estas pueden incluir el diseño adecuado del sistema de drenaje, es importante tener en cuenta los posibles escenarios de lluvia extrema al diseñarlos. Esto implica la construcción de canales de drenaje más amplios, la instalación de alcantarillas de mayor capacidad o la planificación de rutas de evacuación del agua de lluvia.

El mantenimiento regular de los sistemas de drenaje vial debe mantenerse adecuadamente para garantizar que estén en buenas condiciones de funcionamiento. Esto incluye la limpieza regular de alcantarillas y canales, la reparación de cualquier daño y la eliminación de obstrucciones que puedan dificultar el flujo del agua. Adicionalmente, la implementación de medidas de retención de agua, son importantes para reducir el impacto de la variabilidad climática en el drenaje vial y se pueden implementar medidas de retención de agua, como la construcción de estanques o embalses de retención. Estas estructuras pueden ayudar a capturar y retener el agua de lluvia, liberándola de manera controlada para evitar inundaciones repentinas. Es importante contar con sistemas de monitoreo y alerta temprana para identificar rápidamente las condiciones climáticas adversas y tomar las medidas necesarias para minimizar los impactos en el drenaje vial. Esto puede incluir la instalación de estaciones meteorológicas y sistemas de alerta de inundaciones. El drenaje vial y la variabilidad climática están interconectados, y es importante tomar medidas de adaptación para garantizar un sistema de drenaje efectivo y seguro en todas las condiciones climáticas.

1.2 Resumen

Colombia presenta condiciones muy específicas y particulares en cuando a clima y variabilidad temática. Si bien es una nación con una gran productividad hídrica respecto a muchas regiones del mundo, también sufre de los extremos del clima, intensificados por el recuente fenómeno de cambio climático.

La manera de hacer frente o mitigar las consecuencias de los fenómenos macroclimáticos se genera a través de diseños acordes con los periodos de retorno de diseño, correspondientes a extremos que simulen situaciones que podrían derivar en inundabilidad de sectores vulnerables y sobresaturación de taludes de aproximación, independientemente de la condición actual climática, es decir, la del momento o época de los respectivos diseños, ya que ahí precisamente se escala el concepto de periodo de retorno, teniendo en cuenta las probabilidades de ocurrencia, por más bajas que puedan llegar a ser. Pero no sólo el buen diseño de estructuras hidráulicas de drenaje



vial es importante dentro de un plan de optimización de la seguridad vial por extremos climáticos. No se trata únicamente del diseño de cunetas, contracunetas, zanjas de coronación, alcantarillas o bajantes disipadoras y filtros. Sino llamar a colación el concepto de sistema de drenaje urbano sostenible, lo que conocemos como SUDS.

Los sistemas de drenaje urbano sostenibles permiten la disminución de picos de caudal en las zonas bajas de cuencas aportantes a zonas viales o de proyección vial. Radica su importancia en el aumento de la capacidad filtrante o permeable de las coberturas que sean tratadas en dicha aportación. Una zona aportadora impermeable significa una mayor cantidad de caudal circulando en zonas superficiales, es decir, en las coronas viales. Por el contrario, la existencia de un mayor número de zonas verdes significa un mayor número de zonas o regiones permeables, que disminuirán las escorrentías superficiales.

Colombia es un país que hasta inicios del tercer milenio, basaba su mitigación de daños por extremos en medidas poco claras o no muy estandarizadas a lo largo de todo el territorio, sin embargo, a raíz de la ola invernal del año 2010-2011, y sus nefastas consecuencias conocidas en afectación humana y de infraestructura, la ley de gestión del riesgo promulgada en el año 2012, permitió generar y actualizar la infraestructura del país, y no escapa a ello, la condición de las carreteras, que se verán beneficiadas a partir de las nuevas adaptaciones y exigencias consignadas en dicha ley y en el sistema nacional de gestión del riesgo.

1.3 Clima en Colombia

Colombia presenta características hidroclimatológicas únicas en el mundo, debido a que recibe humedad de muchas partes, incluyendo el océano atlántico, el océano pacífico, y la selva amazónica. Todas estas fuentes confluyen en la barrera natural de la cordillera de los Andes, lo que hace especialmente complicado su pronóstico y monitoreo.

El clima está determinado por diversos factores geográficos y atmosféricos, lo que resulta en una gran diversidad climática en todo el país. Colombia se encuentra en la zona intertropical, lo que significa que tiene una variedad de zonas climáticas y éstas incluyen el clima tropical, de montaña, de páramo y el de sabana, entre otros. Tiene dos estaciones principales: la seca y la de lluvias. La estación seca generalmente ocurre en diciembre y enero, así como en julio y agosto, mientras que la de lluvias ocurre en abril y mayo, así como en octubre y noviembre. La precipitación varía ampliamente, algunas regiones, como la región amazónica y la del Chocó, reciben altos niveles de precipitación durante todo el año. En contraste, otras regiones, como la región de La Guajira, son más áridas y reciben menos lluvia (web reference: https://es.wikipedia.org/wiki/Clima_de_Colombia).

La temperatura en Colombia también varía según la altitud y la ubicación geográfica. En general, a medida que se asciende en altitud, las temperaturas tienden a disminuir. Las regiones de montaña, como la zona cafetera, pueden tener temperaturas más frescas, mientras que las regiones costeras y bajas tienden a ser más cálidas. Adicionalmente, también está expuesta a fenómenos climáticos como el fenómeno de El Niño y la Niña, que pueden afectar las condiciones climáticas y las precipitaciones en el país.

El fenómeno del Niño y de la Niña son eventos climáticos que afectan a Colombia y otras regiones del mundo. Estos se producen debido a cambios en la temperatura del océano Pacífico y tienen diferentes efectos en el clima. Básicamente lo que sucede es que se calienta el pacífico frente a las costas de américa del sur, debido a un desbalance de presiones entre esta costa y la costa australiana, generando mayor evaporación y por ende generando corrientes que apartan las masas nubosas del país. Esto implica niveles muy por debajo de la media de precipitación, lo que se conoce como fenómeno



del niño. Se caracteriza entonces por provocar sequías y condiciones de sequedad en algunas regiones de Colombia. Durante el fenómeno del Niño, se producen también altas temperaturas, lo que puede tener impactos negativos en la agricultura, la disponibilidad de agua y la salud humana (Maturana, J, et al, 2004).

El fenómeno de la Niña es el opuesto y se caracteriza por un enfriamiento anormal del océano Pacífico tropical. Durante la Niña, se pueden experimentar lluvias intensas y abundantes en diferentes partes de Colombia. Esto puede llevar a inundaciones, deslizamientos de tierra y otros eventos climáticos extremos. Es importante destacar que estos fenómenos no ocurren de manera constante y su intensidad y duración pueden variar. Los expertos en meteorología y climatología realizan monitoreo y pronósticos para prever la aparición de estos fenómenos y sus posibles impactos en Colombia, midiendo variaciones en los puntos de control frente a la costa australiana y costa sudamericana.

Adicionalmente, y sin tener en cuenta los mencionados fenómenos macroclimáticos recurrentes en territorio colombiano, es un país con un índice muy alto de producción de recurso hídrico, a razón de aproximadamente 60 L/seg.Km², lo que significa que triplica la producción media de Sudamérica y quintuplica la del planeta tierra. Dicha capacidad de producción hídrica tiene como base la cantidad de precipitación que se da en todo el territorio, con una media anual de 3000 mm. Sin embargo, dentro de la misma Colombia, la variabilidad climática y por ende de precipitación es muy alta en lo espacial y lo temporal. Es así como se presentan zonas muy húmedas, como en el Chocó, con regiones con más de 12.000 mm / año, pero también zonas muy secas, como en la Guajira, con menos de 250 mm / año. Estos extremos se intensifican con la presencia de los fenómenos macroclimáticos, como el fenómeno de la Niña, fenómeno del Niño, o el propio cambio climático, donde desde el punto de vista ingenieril, la mayor afectación se presenta en la infraestructura vial.

1.4 Influencia del cambio climático en la generación de infraestructura

La estabilidad económica y social de un país depende en gran medida de la calidad de su infraestructura. A su vez, la calidad de infraestructura estriba en un buen diseño, y mantenimiento. Un buen diseño, implica tener en cuenta todos los parámetros morfométricos, climáticos, físicos y naturales que enmarcan el escenario donde se va a desarrollar dicho diseño. El hecho de no tener en cuenta condiciones influyentes (ejemplo condiciones climáticas) en el área de trabajo o zona de estudio dentro de los diseños, generará consecuencias graves de daño a largo o corto plazo en la infraestructura respectiva.

A continuación, podemos observar algunos ejemplos de daños en la infraestructura vial colombiana, por diseños sin tener en cuenta la extremidad climática del país. El problema de las vías en nuestro país se debe en mayor medida a la no inclusión de los fenómenos macroclimáticos que gobiernan nuestra climatología. Fenómenos como el niño o la niña, son efectos con un periodo de recurrencia comprendido entre 3 y 7 años, por lo tanto, no son eventos aislados.

El clima extremo puede causar daños a las carreteras y puentes, lo que afecta la conectividad y el transporte de personas y mercancías. Las inundaciones erosionan o dañan las estructuras viales, mientras que los deslizamientos de tierra bloquean o destruyen carreteras. Además, las tormentas intensas causan daños en la infraestructura vial, como la caída de árboles o postes eléctricos. Para hacer frente a estos desafíos, es necesario adaptar la infraestructura vial al clima extremo. Esto implica tomar medidas para fortalecer y proteger las carreteras y puentes de los impactos del clima, así como implementar sistemas de alerta temprana para prevenir accidentes y daños en la infraestructura, e implementar sistemas de drenaje adecuados para evitar inundaciones y minimizar el daño causado por las lluvias intensas. Es importante implementar medidas de adaptación para fortalecer y proteger la infraestructura vial contra los efectos del clima extremo.

Para un buen diseño hidráulico (flujos y drenajes) y estructural de una vía, hay que tener en cuenta el agua que entra o puede llegar a entrar al sistema. Para ello debemos realizar un estudio Vial, que incluirá esa evaluación hidrológica.



Figura 1.

Ejemplos de consecuencias viales por ausencia de diseños con contexto climático

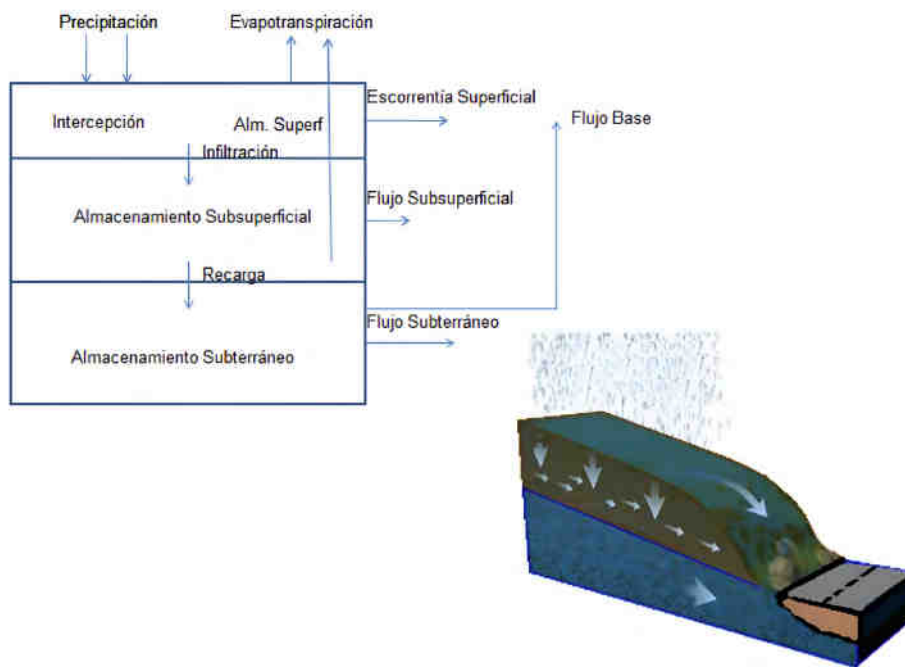


Fuente: Autor

El tener en cuenta la variabilidad climática en los diseños propios de un proyecto de infraestructura vial, significa lograr cuantificar la cantidad de agua que es aportada por escorrentía superficial y subterránea al corredor vial en cuestión, es decir, significa calcular el caudal que aportan las cuencas y subcuencas de manera superficial, pero también de manera subsuperficial y subterránea. Un error muy común en el diseño de drenaje vial, radica en la cuantificación de los caudales superficiales, pero adoptar diseños tipo únicamente para el caso de los caudales subsuperficiales o subterráneos.

Figura 2.

Visualización de aportes superficiales y subterráneos a un corredor vial



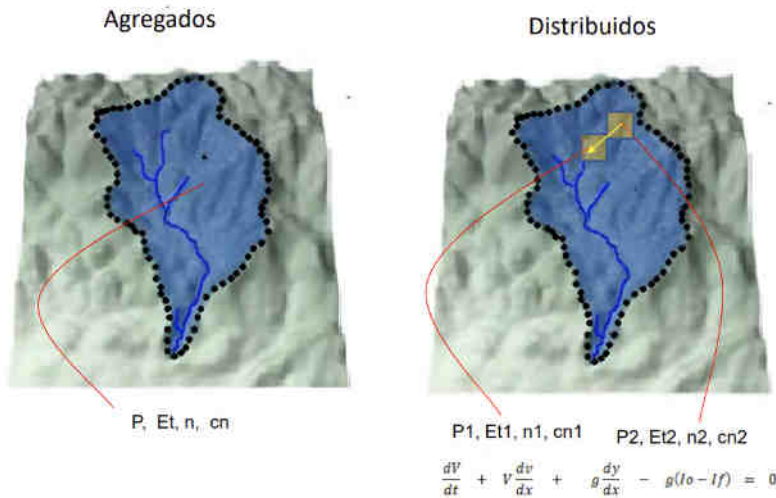
Fuente: Autor

En referencia a la estimación de caudales, existe una abundante cantidad de modelos hidrológicos que permiten el cálculo de dichas aportaciones. La escogencia del tipo de modelo hidrológico dependerá del tipo de cuenca aportante, de la variabilidad u homogeneidad en referencia al tipo de suelo o cobertura vegetal y del tipo de suelo de la zona, así como de la propia disponibilidad de información y la escala de caracterización de dicha información. Igualmente, el uso u objetivo de uso del modelo hidrológico es importante en el momento de definir el tipo de simulación que se requiere. Existen diferentes tipos de modelos hidrológicos que se utilizan para simular y comprender el comportamiento del agua en los sistemas hidrológicos. Los basados en procesos físicos utilizan ecuaciones matemáticas que describen los procesos físicos del ciclo hidrológico, como la precipitación, la evapotranspiración, la infiltración, el escurrimiento superficial y el flujo subterráneo. Estos modelos son complejos y requieren datos detallados sobre las características del terreno y las condiciones climáticas. Los modelos conceptuales, simplifican los procesos hidrológicos utilizando conceptos y relaciones empíricas. Se basan en la idea de que el comportamiento hidrológico se puede describir utilizando un conjunto limitado de parámetros y variables. Estos modelos son más fáciles de implementar y requieren menos datos, pero pueden tener una precisión limitada en comparación con los basados en procesos físicos.

Finalmente, los modelos distribuidos, dividen el área de estudio en subcuencas más pequeñas (en el caso de modelos semi distribuidos) o incluso celdas (modelos distribuidos) y simulan los procesos hidrológicos en cada una de ellas. Esto permite tener en cuenta las variaciones espaciales en las características del terreno, la vegetación y las condiciones climáticas. Estos modelos son más detallados y precisos, pero también requieren más datos y son más computacionalmente intensivos. Los modelos lumped también llamados agregados consideran la cuenca hidrológica como un solo elemento y estas se identifican como promedios para toda la zona de aportación, y no tienen en cuenta las variaciones espaciales en las características del terreno. Estos son más simples y requieren menos datos, pero también tienen una menor capacidad para representar las variaciones locales en los procesos hidrológicos. La elección del tipo de modelo depende de los objetivos de estudio, la disponibilidad de datos y la capacidad computacional disponible. Cada tipo tiene sus ventajas y desventajas, y es importante elegir el modelo adecuado para cada situación.

Figura 3.

Esquema general de los tipos de modelos hidrológicos



Fuente: Autor

Para un buen diseño hidráulico (flujos y drenajes) y estructural de una vía, debemos tener en cuenta en primera medida el agua que entra o puede llegar a entrar al sistema. Para ello, hay que realizar un estudio vial, que incluirá esa evaluación hidrológica. Todo estudio vial y en general cualquiera encaminado a generar infraestructura incluirá las fases de prefactibilidad, factibilidad y diseños definitivos. Una fase de prefactibilidad de un proyecto vial es una fase inicial en la cual se evalúa la viabilidad técnica, económica y ambiental de dicho proyecto. Durante esta etapa, se lleva a cabo un estudio preliminar para establecer si el proyecto es factible y si vale la pena invertir recursos adicionales en su desarrollo. En esta etapa, se realiza una evaluación general del proyecto vial, considerando aspectos como la ubicación, el tráfico esperado, los costos estimados, los impactos ambientales y sociales, entre otros. También se analizan los posibles beneficios y riesgos asociados al proyecto.

El objetivo principal, es obtener información suficiente para tomar una decisión informada sobre si el proyecto vial debe avanzar a la etapa de factibilidad, en la cual se realizará un estudio más detallado y se definirán los aspectos técnicos, financieros y legales del proyecto. Durante la etapa de prefactibilidad, se pueden realizar actividades como la recopilación de datos y estudios preliminares, la identificación de alternativas de diseño y ubicación, la estimación de costos y beneficios, y la evaluación de los impactos ambientales y sociales del proyecto. En resumen, la etapa de prefactibilidad en un proyecto vial es un proceso de evaluación inicial para determinar la viabilidad del proyecto y tomar decisiones informadas sobre su desarrollo posterior. Es una fase importante para garantizar que los recursos se utilicen de manera eficiente y que el proyecto cumpla con los requisitos técnicos, económicos y ambientales necesarios. Allí también se pueden contemplar posibles corredores viales u opciones de ruta donde se evalúan los aspectos anteriores mencionados.

La etapa de factibilidad en un proyecto vial es una fase crucial en la planificación y desarrollo. Durante esta, se realiza un análisis detallado para determinar la viabilidad técnica, económica y ambiental del proyecto. El objetivo principal es evaluar si el proyecto es factible y viable antes de pasar a la etapa de diseño y construcción. Al finalizar la etapa de factibilidad, se emite un informe que resume los resultados de los estudios y evalúa la viabilidad del proyecto. Esta información es fundamental para tomar decisiones informadas sobre la continuidad del proyecto y para obtener los permisos y financiamiento necesarios para su ejecución. Es importante destacar que la etapa de factibilidad es solo una de las fases en el desarrollo de un proyecto vial. Posteriormente, se llevan a cabo las etapas de diseño, construcción y mantenimiento de la vía. Cada una requiere de estudios y análisis específicos para garantizar la calidad y la seguridad de la infraestructura vial. En esta etapa normalmente se ha elegido una de las posibles rutas u opciones de corredor vial que se habían contemplado en la etapa de prefactibilidad.

La fase de diseños definitivos es una etapa en la cual se elaboran los diseños detallados tanto geométricos como de todas las estructuras y obras necesarias para materializar el proyecto. El objetivo principal es diseñar todos los componentes del proyecto de manera que un constructor pueda llevar a cabo su construcción. Durante la etapa

de diseños definitivos, se deben desarrollar los planos y especificaciones técnicas necesarios para la construcción de la infraestructura vial. Esto implica definir con precisión la geometría de las vías, los perfiles de las carreteras, las intersecciones, los sistemas de drenaje, las señales de tránsito, entre otros aspectos. Además, se definen los materiales y métodos de construcción a utilizar, así como los cálculos estructurales hidráulicos e hidrológicos, necesarios para garantizar la seguridad y durabilidad de la infraestructura vial.

Es importante destacar que los diseños definitivos son el resultado de los estudios y análisis realizados en etapas anteriores del proyecto, como la factibilidad y los estudios preliminares. Estos diseños son la base para la ejecución de la obra y deben cumplir con las normas y regulaciones establecidas por las autoridades competentes. Esto garantiza la correcta ejecución de la obra. En referencia a la influencia climática o hidrológica anidada con las diferentes fases de un proyecto de infraestructura vial, se debe tener en cuenta según la etapa respectiva:

Prefactibilidad: Obtención del modelo de elevación digital o DTM. Es importante realizar un estudio detallado del sistema de drenaje para evaluar cómo se manejará el agua de lluvia en el área del proyecto. Esto implica analizar la topografía (DTM), los patrones de lluvia y la capacidad de los sistemas de drenaje existentes o propuestos. Se debe realizar un análisis de las características hidrológicas de la zona, como los caudales de los ríos o arroyos cercanos, la calidad del agua y los posibles riesgos de inundación. Esto ayudará a determinar las medidas de mitigación necesarias para garantizar la seguridad y la eficiencia del proyecto. Además, deben localizarse la disponibilidad de estaciones hidroclimatológicas que puedan caracterizar la zona de estudio y de los corredores viales.

Factibilidad: En esta etapa es importante evaluar la dinámica de los ríos y cuerpos de agua cercanos al proyecto vial. Esto implica analizar la velocidad y dirección del flujo del agua, así como los procesos de erosión y sedimentación que puedan afectar la infraestructura vial. Se deben tomar en cuenta las precipitaciones y el escurrimiento superficial del agua en la zona donde se construirá el proyecto vial. Esto implica diseñar sistemas de drenaje adecuados para evitar inundaciones y garantizar la seguridad vial. En

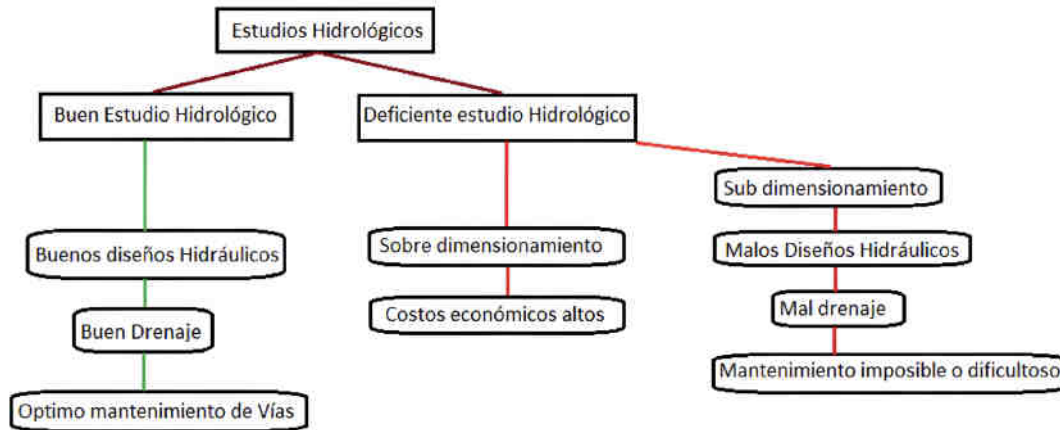


proyectos de infraestructura vial en áreas urbanas, es necesario considerar el impacto del proyecto en el sistema de drenaje urbano. Esto incluye evaluar la capacidad de los sistemas de alcantarillado y desagüe para manejar el aumento del caudal debido a la construcción de la vía. Se iniciará y dará terminación a lo que se considera como prediseños, incluidos los prediseños de alcantarillas, cunetas, contracunetas, bajantes, dispositivos de drenaje subsuperficial y demás elementos de drenaje superficial y subterráneo que se requieran.

En la fase 3 o de diseños definitivos, los aspectos hidrológicos son de suma importancia. Estos se refieren al estudio y análisis de los recursos hídricos y su influencia en el diseño y construcción de la infraestructura vial. El drenaje pluvial es fundamental para controlar la sobresaturación de los taludes y para minimizar efectos sobre la corona. Se realiza el estudio de las precipitaciones y su distribución en el área del proyecto, con el fin de determinar las características del sistema de drenaje necesario para evitar inundaciones y asegurar el correcto funcionamiento de la vía. También la hidrología está presente en los diseños definitivos, influyen en la estabilidad de los taludes de la vía. Se debe considerar el nivel freático, la presencia de aguas subterráneas y la erosión causada por el escurrimiento superficial. Esto permite dimensionar adecuadamente los taludes y diseñar medidas de control de erosión, como muros de contención y sistemas de drenaje en los taludes.

Figura 4.

Esquema general descriptivo de la finalidad de los modelos hidrológicos



Fuente: Autor

1.5 Concepto de prevención vial desde la hidrología y cambio climático

La prevención vial no sólo significa tener en cuenta cuestiones de tráfico o estado de la vía, también, y más aún desde la ley de gestión del riesgo del año 2012 (Colombia), tener en cuenta la hidrología y el cambio climático se refiere a las medidas y acciones que se implementan para mitigar los riesgos viales relacionados con los fenómenos hidrológicos y el cambio climático. Estos riesgos pueden incluir inundaciones, deslizamientos de tierra y otros eventos extremos que afectan la infraestructura vial y la seguridad de los usuarios de las vías.

Importancia de la prevención vial desde la hidrología y el cambio climático significa tenerlos en referencia como posible impacto significativo en la infraestructura y seguridad vial. Los eventos hidrológicos extremos, como las inundaciones, dañan las carreteras y puentes, causan deslizamientos de tierra y obstaculizan el tráfico. Además,



puede aumentar la frecuencia e intensidad de estos eventos, lo que requiere medidas de prevención y adaptación para garantizar la seguridad vial.

Algunas de las medidas de prevención vial teniendo en cuenta extremos climáticos como el fenómeno de la niña, pueden derivarse de algunas evaluaciones preliminares. La evaluación de riesgos hidrológicos, y así realizar estudios hidrológicos para identificar las áreas propensas a inundaciones y deslizamientos de tierra. Esto ayuda a determinar las zonas de riesgo y tomar medidas preventivas adecuadas. El diseño y construcciones resilientes, incorporando consideraciones de hidrología y cambio climático en el diseño y construcción de infraestructuras viales. Esto implica utilizar técnicas y materiales que puedan resistir y adaptarse a los eventos hidrológicos extremos y las condiciones cambiantes del clima. Mantenimiento y monitoreo, realizando un mantenimiento regular de las vías y puentes para garantizar su integridad y seguridad. Además, implementar sistemas de monitoreo para detectar y responder rápidamente a problemas relacionados con la hidrología y el cambio climático.

También son muy importantes las alertas tempranas, incorporándolas para informar a los conductores y usuarios de las vías sobre la presencia de condiciones peligrosas, como inundaciones repentinas o deslizamientos de tierra. La planificación y gestión del territorio, integrando consideraciones de hidrología y cambio climático en la planificación y gestión del territorio para evitar la construcción de infraestructuras viales en áreas de alto riesgo y promover el desarrollo sostenible. Igualmente, la educación y concienciación, promoviendo la educación y concienciación sobre los riesgos viales relacionados con la hidrología y el cambio climático. Esto implica informar a los conductores y usuarios de las vías sobre cómo actuar de manera segura durante eventos extremos y fomentar prácticas de conducción responsables. Estas medidas pueden ayudar a prevenir y mitigar los riesgos viales relacionados con la hidrología y el cambio climático, garantizando la seguridad de las vías y los usuarios. Es importante que los gobiernos, las autoridades viales y la sociedad en general trabajen de manera conjunta para implementar estas acciones y promover una conducción segura en un entorno cambiante.

1.5.1 Ejemplo de aplicación de prevención vial ante efectos climáticos extremos

Los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) son utilizados para disminuir los picos de caudal en vías. Estos se implementan con el objetivo de regular el flujo de agua durante eventos de lluvia intensa y evitar inundaciones en áreas urbanas. Los SUDS utilizan diferentes técnicas y componentes para lograr esta reducción en los picos de caudal. Algunas de las técnicas comunes incluyen la captación y almacenamiento del agua de lluvia, infiltración en el suelo, utilización de superficies permeables, creación de áreas verdes y construcción de estanques de retención.

Al disminuir los picos de caudal, los SUDS ayudan a controlar el flujo de agua en las vías y evitan la sobrecarga del sistema de drenaje convencional. Esto tiene beneficios tanto en términos de prevención de inundaciones como en la reducción de costos de infraestructura, ya que se pueden utilizar tuberías de menor tamaño y pendientes menos pronunciadas en la red de drenaje. Los sistemas (SUDS) son una solución efectiva para disminuir los picos de caudal en vías, evitando inundaciones y reduciendo los costos de infraestructura. Estos utilizan diferentes técnicas y componentes para regular el flujo de agua durante eventos de lluvia intensa. Algunos ejemplos de SUDS para control de picos de caudal sobre vías o cuencas urbanas son:

- » **Bioswales:** Los bioswales son canales o zanjas revestidas con vegetación que ayudan a filtrar y retener el agua de lluvia. Estos permiten que el agua se infiltre en el suelo gradualmente, reduciendo así el caudal de escorrentía y disminuyendo los picos de caudal en las vías.
- » **Pavimentos permeables:** Están diseñados para permitir que el agua de lluvia se infiltre a través de ellos, en lugar de generar escorrentía. Estos pavimentos están compuestos por materiales porosos que permiten que el agua se filtre gradualmente hacia el suelo, reduciendo así el caudal de escorrentía y disminuyendo los picos de caudal en las vías.

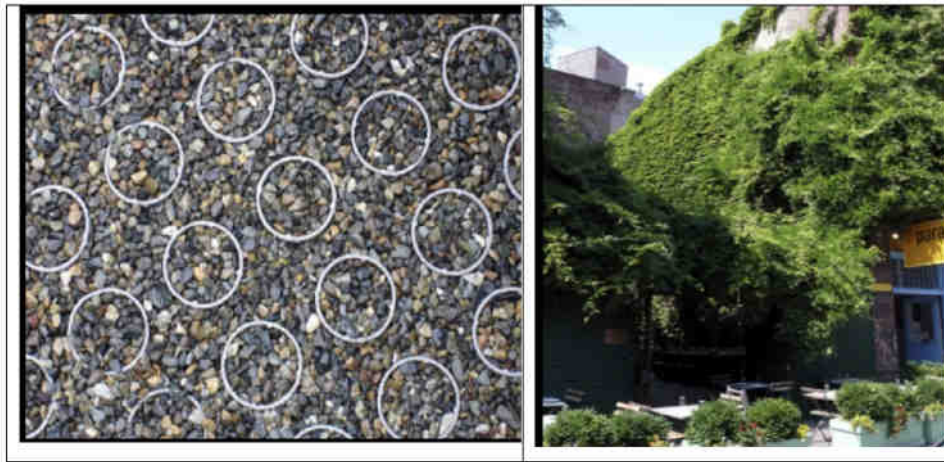


- » **Techos verdes:** Son sistemas de vegetación instalados en los techos de los edificios. Estos retienen el agua de lluvia, evitando que llegue directamente a las vías y generando escorrentía. Al retener el agua, los techos verdes ayudan a reducir los picos de caudal en las vías.
- » **Estanques de retención:** Son estructuras diseñadas para almacenar temporalmente el agua de lluvia y liberarla gradualmente. Estos ayudan a disminuir el caudal de escorrentía y reducir los picos de caudal en las vías.
- » **Filtros de agua:** Son sistemas que retienen y tratan el agua de lluvia antes de liberarla. Estos ayudan a reducir el caudal de escorrentía y disminuir los picos de caudal en las vías al filtrar y retener los contaminantes presentes en el agua de lluvia.

Figura 5.

Algunos escenarios SUDS





Fuente: Instituto Flumen





MODELACIÓN HIDROLÓGICA DISTRIBUIDA
EN VÍAS

CAPÍTULO 2

CONCEPTOS HIDROLÓGICOS

CAPÍTULO 2. CONCEPTOS HIDROLÓGICOS

2.1 Introducción

La hidrología es una disciplina que estudia las propiedades y usos de los recursos hídricos del planeta, incluyendo su distribución, propiedades químicas y físicas, así como su relación ante diferentes procesos y fenómenos. Como núcleo de la hidrología se encuentra el ciclo hidrológico, que es un proceso cerrado y continuo del comportamiento y circulación del agua en el planeta, en el cual se evapora desde la superficie terrestre y los cuerpos de agua, se condensa en la atmósfera, y se precipita como lluvia o nieve, para luego retornar a los océanos, cuerpos de agua infiltrándose en el suelo para formar acuíferos. La Escorrentía comprende el flujo de agua superficial después de una precipitación. (OMM).

Por su parte, la infiltración es el proceso por el cual el agua de lluvia o nieve penetra en el suelo. La velocidad de infiltración depende del grado de permeabilidad del suelo, y de la intensidad de la precipitación. La evaporación es el proceso mediante el cual el agua líquida se transforma en vapor de agua y se incorpora a la atmósfera. Ocurre principalmente desde cuerpos de agua, suelos húmedos y vegetación. La transpiración es el proceso por el cual las plantas liberan vapor de agua a través de sus hojas. Este proceso contribuye a la pérdida de agua de la vegetación y a la transferencia de humedad a la atmósfera. Por su parte, la precipitación es la forma en que el agua se deposita en la superficie terrestre, ya sea en forma de lluvia, nieve, granizo o aguanieve.

Es un componente fundamental del ciclo hidrológico y es crucial para la disponibilidad de agua dulce en la Tierra.

La hidrología es fundamental para la gestión de los recursos hídricos, ya que proporciona información crucial para la planificación y el manejo sostenible de los recursos de agua dulce. Esto incluye la incidencia lógica que tienen sus variables implícitas en referencia a la generación de los diferentes tipos de infraestructura, entre las que se destaca la de tipo vial.

2.2 Resumen

Las variables hidrológicas que hacen parte del ciclo hidrológico forman parte de lo que conocemos como balance hídrico, y garantizan un comportamiento del clima y de la interacción con el ser humano y la naturaleza en general, constante o tendiente a la estabilidad año a año. Sin embargo, factores antrópicos y naturales, han influido en desbalances hidrológicos sectoriales que afectan la estabilidad climática del planeta y que conocemos como cambio climático, evidenciando acentuación de extremos a lo largo y ancho de las regiones en el mundo. Dicho cambio ha evidenciado sobreestimación de las principales variables del ciclo hidrológico, haciendo necesaria la adaptación de los diseños que tienen que ver con diseños y construcción de infraestructura hidráulica con diferentes propósitos, en este caso, con el fin de salvaguardar novales confiables de seguridad vial.

Muchos de los problemas en cuanto a daños a la infraestructura vial nacional, evidenciados en gran medida a partir del fenómeno invernal del 2010 -2011 en Colombia, tuvieron que ver con avalanchas y derrumbes, así como fallos de calzada, producidos principalmente por sobresaturaciones de los taludes y arrastre de material erosionado, que afectaron los principales corredores viales del país. La elevación en los niveles de escorrentía superficial y de flujos subsuperficiales y subterráneos en las



zonas de aportación vial, fueron una constante hidrológica recurrente, y dicha realidad contrastó con la muy débil calidad estructural de las vías nacionales en lo concerniente con drenaje vial. Lo cual quedó en evidenciada y con altísimos costos institucionales para el país en ese 2010-2011, lo que impulsó la generación del sistema nacional de gestión del riesgo, y con él, la necesidad de procedimientos claros para cuantificación de flujos máximos actuantes sobre redes de drenaje naturales y sobre zonas aportantes y aportadas con interacción de infraestructura sensible. Por tal motivo, es necesario que la modelización hidrológica garantice las aportaciones ajustadas de cuantificación de caudales superficiales y subterráneos a las zonas de interés, que para este caso enfatiza a los proyectos de infraestructura vial, y más específicamente, a lo que tiene que ver con su drenaje a cuerpos receptores naturales. Los modelos de cálculo de dichas aportaciones pueden ser de tipo agregado, semi distribuido o distribuidos, dependiendo del uso real u objetivo de infraestructura a desarrollar.

2.3 Balance hídrico

Se refiere al equilibrio entre las entradas y salidas de agua en un área o sistema específico. Es una medida de la disponibilidad y gestión del agua dentro de ese sistema. Tiene en cuenta diversos factores como la precipitación, la evaporación, la transpiración, el escurrimiento y la recarga de aguas subterráneas. Además, es importante para el manejo sostenible de los recursos hídricos. Ayuda a comprender la disponibilidad y los patrones de uso del agua en un área, lo cual es esencial para la planificación y la toma de decisiones en cuanto a la asignación de agua, el riego y los esfuerzos de conservación.

El balance hídrico es compuesto por variables hidroclimatológicas, que son la precipitación, la evaporación o evapotranspiración (dependiendo del escenario), la escorrentía superficial, la infiltración, la recarga subterránea y el caudal subterráneo. La precipitación incluye la lluvia, la nieve y cualquier otra forma de agua que llega a la superficie terrestre. La evapotranspiración es la pérdida combinada de agua a través

de la evaporación de la tierra y las masas de agua, y la transpiración de las plantas. El escurrimiento o escorrentía superficial es la porción de la precipitación que fluye sobre la superficie terrestre y llega a ríos, lagos u océanos, también se le conoce como precipitación efectiva o escorrentía directa. La infiltración es el proceso por el cual el agua se filtra hacia el suelo y recarga las aguas subterráneas, y la recarga de aguas subterráneas es el movimiento de agua desde la superficie hacia el sistema de aguas subterráneas.

El balance hídrico se calcula comparando las entradas (precipitación, recarga de aguas subterráneas) con las salidas (evapotranspiración, escurrimiento, extracción de agua). Si las entradas superan a las salidas, el área se considera que tiene un balance positivo, lo que indica un excedente de agua. Por el contrario, si las salidas superan a las entradas, indica un balance negativo y un déficit de agua.

2.3.1 Cálculo del balance hídrico

Consiste en cuantificar y sumar los flujos de entrada y salida de agua en un área o sistema. Dicho balance puede llegar a darse por separado entre las diferentes zonas del suelo y para una determinada zona de aportación o cuenca, o para un sistema específico, como un embalse, laguna o área de estudio. En referencia a la precipitación, se obtendrían los datos de precipitación en el área de interés durante un período específico, y esta sería una entrada de la zona superficial del suelo. Para calcular la recarga de agua subterránea, se calcula la cantidad de agua que se infiltra al suelo, descontando previamente el agua que se va por escorrentía superficial, y la evaporación o evapotranspiración.

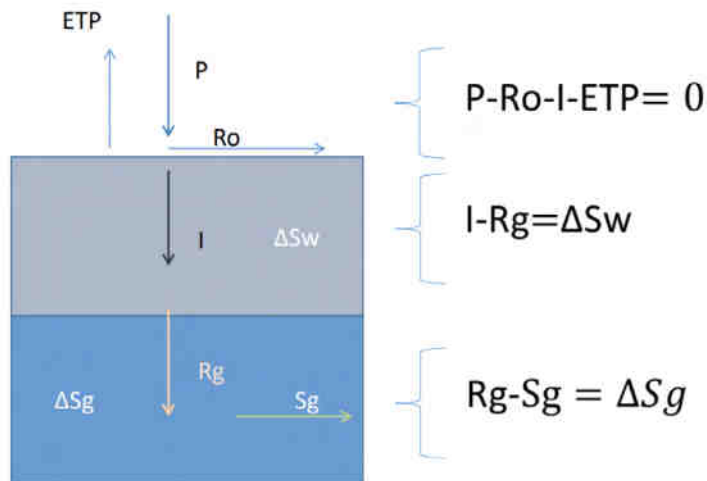
A su vez, para deducir la evapotranspiración, se calcula la cantidad de agua que se evapora de la superficie del suelo y de las masas de agua, así como la cantidad de agua que es transpirada por las plantas. El escurrimiento o escorrentía superficial estima la cantidad de agua que fluye sobre la superficie y se dirige hacia ríos, lagos u océanos. Es importante tener en cuenta que el cálculo del balance hídrico puede ser más complejo y



preciso dependiendo de la disponibilidad de datos y del contexto específico. En algunos casos, se pueden utilizar modelos hidrológicos más avanzados para realizar estimaciones más detalladas del balance hídrico, como lo es el caso de la determinación de variables hidrodinámicas, lo que radica en el tema principal del presente documento.

Figura 6.

Balance hídrico según estrato del suelo



P: Precipitación; Ro: Escorrentía; ETP: Evapotranspiración; I: Infiltración; Rg: Recarga; Sg: Flujo subterráneo

Fuente: Autor

Todas las variables, dentro del cálculo de balances sectoriales por capa del suelo, deben trabajarse a partir de zonas de aportación. Y el cálculo de caudales de aportación que afecten zonas a drenar o donde diseñemos las respectivas estructuras hidráulicas o sistemas viales, dependen de esa zona de aportación y de la magnitud de la climatología de esa zona o sus aferencias.

2.3.2 Ejemplo de cálculo del balance hídrico

A manera de ejemplo de cálculo de un balance hídrico, vamos a asumir dos tipos de ejercicio o problemas.

Ejemplo 1. Asumir una cuenca de 100 Km², con una precipitación mensual media para el mes de enero, de 10 mm. La cuenca permite una infiltración media, según su tipo de suelo, de 2 mm mensuales. Adicionalmente, para un mes de enero promedio, se dan 2 mm de evapotranspiración. La cuenca no acumula o permite encharcamiento superficial. Calcular la esorrentía superficial media a la salida de la cuenca para un típico mes de enero.

Solución: Inicialmente plantear la ecuación de balance hídrico que gobierna la zona del suelo en la cual se plantea el ejercicio, en este caso la zona superficial.

$$P - Ro - I - ETP = 0$$

Inicialmente trasladamos todas las variables, por conveniencia procedimental, a unidades de mm/mes. De esta manera $P=10$ mm/mes, $I=2$ mm/mes, $ETP=2$ mm/mes. Si el enunciado de nuestro ejercicio no aportara dichas unidades, tendríamos que hacer conversión de unidades para expresarlas de esta manera.

$$10 \frac{\text{mm}}{\text{mes}} - Ro - 2 \frac{\text{mm}}{\text{mes}} - 2 \frac{\text{mm}}{\text{mes}} = 0$$

Del balance hídrico se tendrá $Ro=6$ mm/mes. Sin embargo, y debido a que la incógnita hallada es un caudal, hay que expresar dicha variable en unidades correspondientes. Aquí, es importante tener en cuenta la zona de aportación, o región que es tomada en cuenta como zona que aporta ese valor unitario de esorrentía. Es decir, multiplicar la esorrentía dada como nivel hallado, por el área aportante, en este caso 10 Km², y posteriormente realizar la transformación de unidades hasta llegar a m³/s o L/s

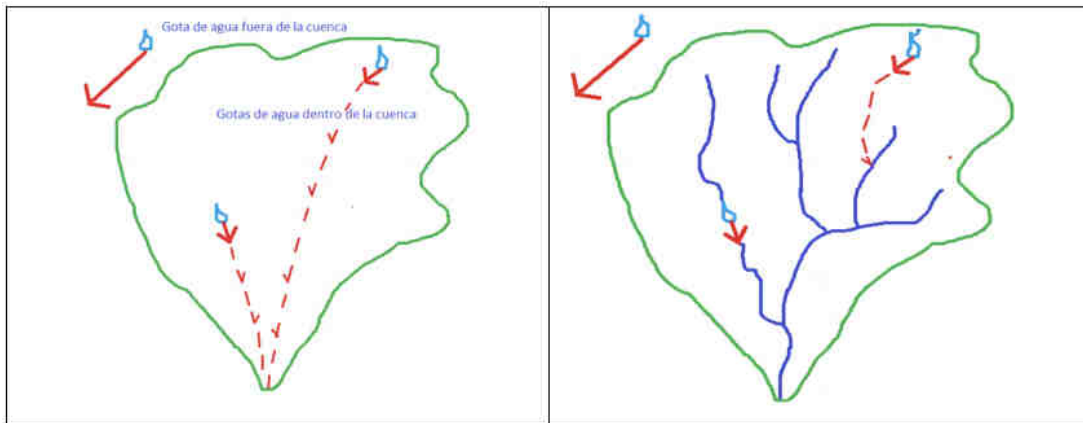


$$6 \frac{\text{mm}}{\text{mes}} * \frac{1 \text{ m}}{1000 \text{ mm}} * \frac{1 \text{ mes}}{31.536.000 \text{ s}} * 10 \text{ Km}^2 * \frac{1000000 \text{ m}^2}{1 \text{ Km}^2} = 0.0019 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Así, tenemos que el resultado de nuestro ejercicio aporta que la escorrentía o caudal superficial a la salida de la cuenca es $R_o = 0.0019 \text{ m}^3/\text{s}$

2.4 Morfometría de cuenca

Como zona de aportación a un punto de interés, en este caso, un corredor vial, se analiza la topografía, tipo de drenaje y área, donde ante un evento de precipitación, la parte baja de esta zona o cuenca responde con mayor o menor cantidad de flujo, y de manera rápida o lenta, por lo tanto, la región de estudio para el proyecto de infraestructura, debe tener en estudio todas sus zonas aportantes. Una cuenca, desde la óptica ingenieril, se debe concebir como una zona o región de aportación, donde toda gota de agua que cae en su límite drena o tiende a hacerlo en dirección hacia la salida de dicha cuenca, fundamentalmente debido a la tendencia o condición orográfica. El límite de una cuenca lo determina las curvas de nivel topográfico. La primera pregunta, estaría en relación a qué es o dónde ubicar la salida de una cuenca, y es allí donde hay que llamar la otra opción de definición de cuenca, es decir, entender que se trata de una zona aportante o de aportación. Por lo tanto, cualquier punto donde se requiera evaluar un caudal aportante, se convertirá en una salida de una cuenca, y el caudal estará en función del área que aporta a ese punto de interés.

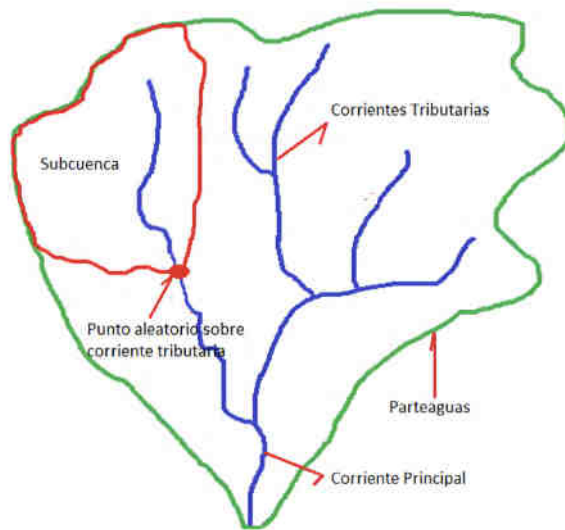
Figura 7.*Concepto de cuenca*

Fuente: Autor

Naturalmente, la gota de agua que cae dentro de lo que se formó como límite topográfico de cuenca, drenará más rápido o menos rápido, dependiendo del número de corrientes que se tengan (en el caso de una cuenca natural), o del tipo de cobertura vegetal o suelo. Las características geomorfológicas condicionantes son de dos tipos, respecto a la cantidad de caudal (área de zona de aportación y tipo de suelo) y a la velocidad de respuesta (orden de corrientes, pendiente, y número de cauces). La cuenca al ser una zona aportante a un punto de salida, permite a su vez tener zonas aportantes internas, es decir subcuencas que van aportando y uniendo flujos de otras subzonas hasta llegar a acumular el flujo total a la salida de la cuenca total. Por ende, el caudal de dichas subcuencas siempre será menor que el de la salida de cuenca total, ya que tienen menor área aportante.

Figura 8.

Concepto de subcuenca



Fuente: Autor

El concepto de subcuenca es muy importante, ya que es el principio conceptual de lo que se conoce como modelación hidrológica semidistribuida, donde las zonas de aportación internas o subcuencas, transfieren aportes que se van acumulando a través de transporte, hacia la salida total.

2.4.1 Indicadores de eficiencia de una Cuenca

En referencia a las corrientes, como se había relacionado anteriormente, intervienen mucho en la rapidez con la que una gota de agua pueda llegar más rápido o no a la salida de la zona de aportación, por lo tanto, la longitud y número de corrientes intervendrán mucho en el grado de respuesta.

2.4.1.1 Densidad de corrientes (D_s)

Se refiere al número de corrientes perenes e intermitentes por unidad de área. Una corriente perene, es aquella que tiene flujo base, es decir, parte de su caudal proviene, no sólo del agua lluvia, sino de un aporte subterráneo que viene de la zona subterránea o zona 3. Por su parte, las corrientes intermitentes son aquellas que deben su flujo únicamente al agua proveniente de la precipitación. En el caso de una corriente intermitente, si no llueve, no transportará agua, y en el de una corriente perene, si no llueve, igual llevará caudal, y será el flujo base.

$$D_s = \frac{N_s}{A}$$

Las densidades mayores a 3,5, se consideran desde lo hidrológico, como altas.

2.4.1.2 Densidad de drenaje

Al igual que la densidad de corrientes, es importante para determinar el grado de respuesta de la cuenca. En este caso, la longitud de corrientes se considera para verificar rendimiento:

$$D_d = \frac{L_s}{A}$$

La densidad de drenaje es considerada como la longitud de las corrientes por unidad de área. Si la longitud está dada en unidades métricas entonces el área deberá trabajarse igualmente en unidades métricas, o en las que se considere.



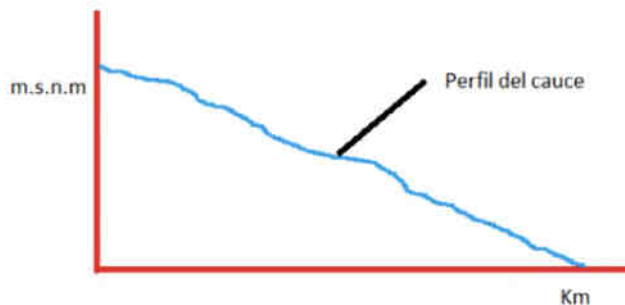
En referencia al rendimiento hídrico de una cuenca, cuando presentan densidades altas, se considera que se tiene una rápida respuesta ante una tormenta, y pueden presentarse también en donde los suelos se erosionan fácilmente. Los suelos erosionados son relativamente impermeables. También puede darse cuando se tienen pendientes altas y cobertura vegetal escasa. En referencia a respuestas lentas, se dan con densidades pequeñas, o también donde los suelos son muy resistentes a la erosión o son muy permeables. El grado de respuesta de una cuenca uno de los indicadores más importantes, puede evidenciarse por condiciones de pendiente media y forma de la cuenca.

2.4.1.3 Pendiente

La pendiente de la cuenca puede referenciarse como la pendiente del curso principal de la zona de aportación, y existen en hidrología muchos métodos para determinarla. Dos metodologías muy recurrentes: el primero de los métodos sería el de pendiente media, donde se tiene en cuenta el desnivel entre los extremos de una corriente dividida entre su longitud media en planta.

Figura 9.

Pendiente media

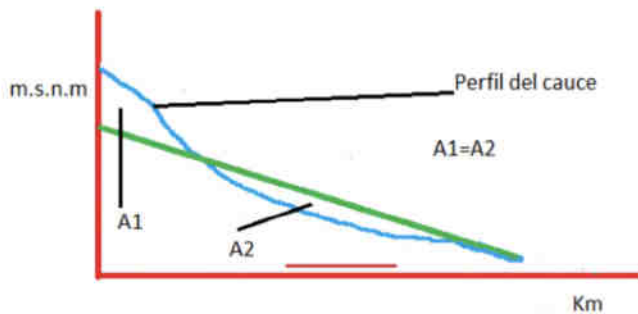


Fuente: Autor

El segundo método, consiste en una pendiente de equilibrio, donde la pendiente se mide a través de una línea imaginaria que desde el extremo aguas abajo de la corriente, hace que se generen áreas iguales entre el perfil del cauce y dicha línea. Cuando se logra esa condición, se saca la pendiente media a esa línea que dio el equilibrio. Las cuencas con pendientes altas tienden a requerir mayor cuidado en sus coberturas, ya que cuencas desprotegidas o erosionadas tienden a ser base de fenómenos torrenciales, arrastrando material erosionado ante eventos macroclimáticos como precipitaciones muy fuertes o con altos periodos de retorno.

Figura 10.

Pendiente de equilibrio



Fuente: Autor

2.4.1.4 Tiempo de concentración

El tiempo de concentración de una cuenca es lo que tarda una gota de agua en llegar a la salida de la cuenca, desde el punto más lejano de ella, normalmente cuantificado en condiciones ideales prismáticas. Existen numerosas expresiones para determinar el tiempo de concentración, entre las que se destaca la fórmula de Kirpich, ampliamente usada en hidrología superficial.



$$T = 0.02 * L^{0.77} * S^{-0.385}$$

Donde T es el tiempo de concentración (minutos), L es la distancia máxima a la salida (m), y S es la pendiente media del lecho (m/m). El tiempo de concentración de una cuenca o zona de aportación es importante en el proceso de modelización hidrológica, ya que indica específicamente en qué momento toda la cuenca empieza aportar a la salida de cuenca o punto de interés, lo que significa que es el momento en el que se presenta el caudal máximo o caudal punta. El tiempo de concentración también es usado como variable de entrada a la escogencia de curvas IDF de diseño, en el momento de determinar caudales aportantes por periodos de retorno de diseño, como se mostrará posteriormente.

2.4.1.5 Coeficiente de compacidad (Kc)

Relaciona el perímetro de la cuenca y el de una circunferencia de un círculo de área igual a la de la cuenca. Si la forma de la cuenca es circular...su coeficiente de compacidad se acercará a 1. Mientras más redonda sea una cuenca mayor tendencia a las crecientes se presentará.

$$Kc = \frac{P}{2 * \pi * \sqrt{\frac{A}{\pi}}} = 0.28 * \frac{P}{\sqrt{A}}$$

Es decir que el coeficiente de compacidad dependerá directamente del área de la cuenca y el perímetro de ésta.

2.4.1.6 Factor de forma (Kf)

Se refiere a la relación entre el ancho medio y la longitud axial de la cuenca. Comparando dos cuencas, una con un Kf menor tendrá menos crecientes que otra con igual área.

$$Kf = \frac{B}{L} = \frac{A}{L^2}$$

Allí, la longitud axial L está en Km, y es el curso de agua más largo desde la cabecera a su desembocadura. A su vez, el ancho medio B en Km es igual a A/L, e igualmente A es el área de la cuenca en Km².

En cuanto a cálculo de caudales resultantes de esas zonas de aportación, para proyectos viales y sus drenajes respectivos, ya hay modelos hidrológicos agregados, semi distribuidos y distribuidos. Pero antes de detallar algunos de esos, es bueno tener en cuenta que cualquiera de ellos tiene como parámetro principal de entrada, la climatología, y principalmente, la precipitación. ¿Qué tipo de climatología o precipitación se introduce en estos modelos?

En realidad, el tipo de precipitación depende de tres consideraciones. El tipo de modelo, donde se debe definir si es agregado, distribuido o semi distribuido. Cuando es distribuido, tiende a solicitar mayor detalle en la precipitación a incluir, es decir, puede solicitar información a nivel incluso de segundos, por ejemplo 1 mm/segundo. Cuando se trata de un modelo agregado, puede trabajarse a nivel anual o mensual. En ese mismo sentido, según el tipo de modelo, se solicitará trabajar con intensidades de precipitación de diseño, o con precipitaciones de diseño.

La segunda consideración es respecto al propósito de la modelización. ¿Vamos a calcular caudales medios? ¿Máximos o mínimos? ¿Cuál será el objetivo de nuestro proyecto? Hay que tener en cuenta que lo que se está realizando es un tipo de pronóstico ante unas posibilidades climáticas. Por ello, usamos registros históricos de precipitación, y es allí donde asumimos en cuenta probabilidades de ocurrencia a partir de periodos de retorno. Por ende, se trata de tener en cuenta registros multianuales, para poder



calcular ya sea la intensidad de precipitación de diseño, o la precipitación de diseño. Finalmente, la tercera consideración es respecto a la red de información climatológica. ¿Tenemos sólo una estación de precipitación con registros históricos? ¿Tenemos 2? 3? 5?, están dentro de la cuenca? ¿O están fuera de la cuenca, pero con aferencia dentro de la cuenca? De ello dependerá que se realice un procedimiento para que la información de precipitación o intensidad de precipitación obtenida sea areal o no.

2.5 Precipitación vs intensidad de precipitación

La precipitación significa caída de agua, en forma de lluvia o nieve. La intensidad de precipitación es la cantidad de precipitación que cae en un determinado período de tiempo. Se refiere a qué tan fuerte o débil es la lluvia en un momento específico. Esta se puede medir en diferentes unidades, como milímetros por hora (mm/h) o pulgadas por hora (in/h). Esta medida es importante para entender el impacto de la lluvia en diferentes áreas, como la agricultura, la gestión de recursos hídricos y la planificación urbana. La intensidad de precipitación puede variar ampliamente según la ubicación geográfica y las condiciones atmosféricas. En algunas regiones, pueden ocurrir lluvias intensas y torrenciales, mientras que en otras áreas la lluvia puede ser más ligera y moderada, y esa variabilidad no es solo espacial, también en el mismo evento siempre se notará variabilidad temporal de ella.

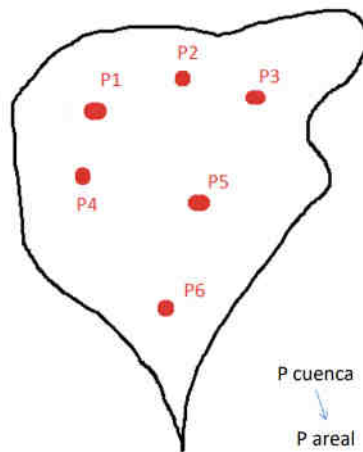
Es importante tener en cuenta que la intensidad de precipitación puede influir en diversos aspectos, como la erosión del suelo, el caudal de los ríos, las inundaciones y la disponibilidad de agua para uso humano y agrícola. La clasificación de la intensidad de la lluvia varía según la cantidad registrada en una hora. Se puede hablar de lluvia débil, moderada, fuerte o torrencial, dependiendo de la cantidad de precipitación en ese período de tiempo.

2.6 Precipitación areal

Tanto las intensidades de precipitación como las precipitaciones deben concebirse como variables areales en el caso de modelos agregados y semi distribuidos. Para modelos distribuidos, pueden asignarse las variables climáticas de manera areal o puntual, dependiendo de la disponibilidad de información. El origen de los valores de precipitación son las cartas climatológicas, y el tipo de variable dependerá de la temporalidad deseada según el objetivo del estudio, por otra parte, las intensidades de precipitación se obtienen de las curvas IDF (Intensidad – duración – frecuencia). La precipitación o intensidad de precipitación sobre un área quiere decir sobre una cuenca (en modelación hidrológica), sea esta rural o urbana. ¿Cómo estimar la precipitación promedio sobre esta área? ¿Se trata de una precipitación media anual? ¿Media mensual? ¿De un evento de tormenta?

Figura 11.

Concepto de precipitación areal



Fuente: Autor



Se puede llegar a tener más de una estación de precipitación, o más de un punto de curvas IDF, pero la representación necesaria por parte de un modelo hidrológico, en la mayoría de los casos es única, y de ahí nace el concepto de precipitación areal. Existen varios métodos para cálculo de la precipitación areal de una cuenca o zona aportante, aclarando que los métodos no servirían únicamente para la precipitación, sino para cualquier variable climática, es decir, podríamos expresar también la intensidad de precipitación areal. Su uso depende de la variabilidad espacial de la precipitación, a mencionar los más usados, el promedio Aritmético, los polígonos de Thiessen y las Isoyetas.

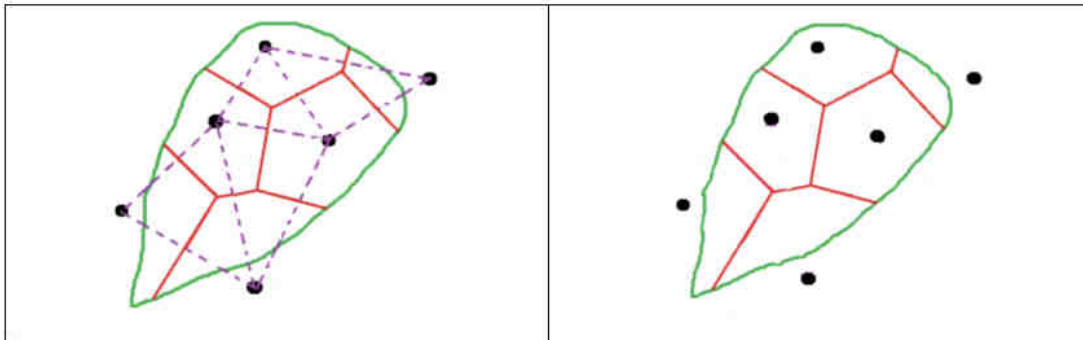
Los polígonos de Thiessen, también conocidos como diagramas de Voronoi o teselación de Voronoi, son una construcción geométrica que permite dividir el plano euclidiano en regiones poligonales. Estos polígonos se generan a partir de un conjunto de puntos de control, de manera que cada punto tiene asignado un polígono que abarca todas las ubicaciones más cercanas a ese punto que a cualquier otro punto de control. Los polígonos de Thiessen son útiles en diferentes áreas, como la interpolación de datos, la planificación urbana, la geomorfología, la hidrología y la cartografía. En el contexto de la interpolación de datos, se utilizan para estimar valores en ubicaciones no muestreadas. Cada polígono representa un área de influencia alrededor de su punto de control, de modo que cualquier ubicación dentro del polígono se considera más cercana a ese punto que a los demás puntos de control. La generación de polígonos de Thiessen se basa en trazar las mediatrices de los segmentos que unen los puntos de control. Las intersecciones de estas mediatrices determinan los vértices de los polígonos. Estos pueden tener diferentes formas y tamaños, dependiendo de la distribución de los puntos de control.

En el campo de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), existen herramientas y algoritmos disponibles para generar polígonos de Thiessen a partir de un conjunto de puntos. Estas herramientas permiten crear capas de polígonos de Thiessen a partir de datos de puntos y se utilizan para análisis espaciales y representaciones visuales de la distribución de los puntos de control. Los Triángulos deben ser preferiblemente acutángulos, con el fin de lograr un procedimiento sencillo. En el caso de ser imposible que todos los triángulos sean acutángulos, se notará que el punto de unión de las

mediatrices estará fuera del triángulo y ello obligará a que se tengan que seleccionar a criterio las mediatrices que se conservarán en el procedimiento y a desechar aquellas que se considere que no aportan al proceso.

Figura 12.

Procedimiento Polígonos de Thiessen



Fuente: Autor

Se debe tener en cuenta que no necesariamente las estaciones que están dentro de la cuenca son las únicas que hacen parte del proceso de formación de los polígonos de Thiessen. Como se observa en la figura del procedimiento, puede haber estaciones partícipes, aun estando afuera de la cuenca, desde que puedan llegar a tener aferencia dentro de la zona de aportación, y la manera de verificarlo lo confirmaría o no el procedimiento de los polígonos de Thiessen.

El otro método muy usado igualmente para cálculo de precipitaciones areales es el de las isoyetas, que es una técnica utilizada para calcular la precipitación areal de una cuenca. Consiste en determinar isolíneas de igual precipitación, llamadas isoyetas, que unen puntos con la misma cantidad de lluvia. Este método es considerado el más preciso, ya que permite tener en cuenta los efectos de topografía en el cálculo de la lluvia sobre la cuenca. Para aplicarlo, se siguen los siguientes pasos. Primero, se realiza

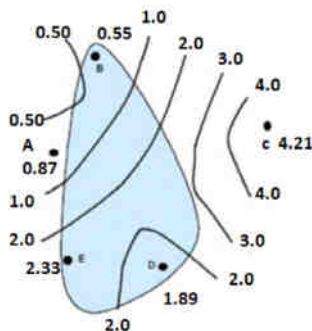
una interpolación de una superficie de raster con los puntos de valor de las estaciones. Esto permite obtener una estimación de la precipitación en todos los puntos de la cuenca. Posteriormente, se trazan curvas de nivel, que se obtienen por poligonales utilizando la herramienta "Curva de nivel". Estas curvas representan las isoyetas, es decir, las líneas que unen puntos con la misma precipitación. Finalmente se realiza el recorte, donde una vez obtenidas las curvas de isoyetas en polígono, se recortan según los límites de la cuenca hidrográfica. Esto permite delimitar el área de estudio y obtener las isoyetas específicas para esa cuenca.

Una vez construidas las isoyetas, se determina el área entre ellas para poder calcular la precipitación media o areal. Esto se realiza mediante la fórmula:

$P_m = \Sigma(P_j * A_j) / \Sigma A_j$ donde P_m es la precipitación media, P_j es el valor de la precipitación de la isoyeta j , A_j es el área incluida entre dos isoyetas consecutivas (j y $j+1$). Se suman los productos de los valores de precipitación de cada isoyeta por el área entre ellas, y se divide entre la suma de las áreas entre isoyetas. El método de las isoyetas es ampliamente utilizado en estudios hidrológicos, ya que proporciona una cuantificación de la precipitación media en una cuenca y presenta de manera gráfica la distribución de la lluvia sobre la zona para el período considerado.

Figura 13.

Procedimiento trazado de isoyetas



Fuente: Autor

El método aritmético, que radica en el promedio de los valores de precipitación de las estaciones, sin ningún tipo de interpolación previa, podría llegar a usarse en el caso en el que las estaciones quedaran equidistantes y la zona fuera plana o tendiente a la planicie.

Para el cálculo de la precipitación areal en el caso de los polígonos de Thiessen, debe multiplicarse el valor de precipitación de la estación por su peso areal representado por el área aferente hallado, y posteriormente sumarse todos estos productos para dividir el resultado por el área total de la cuenca. En el caso de usar el método de isoyetas, el cálculo de la precipitación areal cambia y en vez de referirnos a la multiplicación de las precipitaciones por un área aferente, sino un área entre isoyetas, y la precipitación se referirá a una precipitación media entre isoyetas.

Tabla 1.
Cálculo de precipitación areal según método de ponderación

$P = \frac{\sum P_i * A_i}{A \text{ total}}$	$P = \frac{\sum \bar{P}_i * \bar{A}_i}{A \text{ total}}$
P areal por polígonos de Thiessen	P areal por Isoyetas

Fuente: Autor



2.7 Lluvia de Proyecto

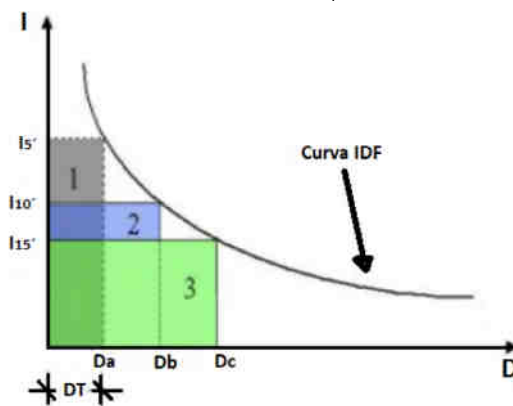
En algunos de los proyectos hidrológicos relacionados con infraestructura vial, como es el caso de los proyectos viales, las aportaciones son derivadas de la aplicación de exigencias gubernamentales que piden la aplicación de periodos de retorno de diseño, es decir teniendo en cuenta extremos climáticos. Uno de los procedimientos más empleados en hidrología, para ello, es la aplicación del método de los bloques alternados.

El método de los bloques alternados es una técnica utilizada para la generación de hietogramas de lluvia de proyecto. Este método permite obtener una estimación de la cantidad de precipitación que se espera en un determinado periodo de tiempo, utilizando datos históricos de lluvia. En el método de los bloques alternados, se divide la duración total de la lluvia en varios bloques de tiempo. Cada bloque representa un intervalo de tiempo en el cual se estima una intensidad de lluvia constante. Estos alternan entre periodos de lluvia y sin lluvia. La intensidad de lluvia utilizada en cada bloque se calcula a partir de la curva Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF), la cual muestra la relación entre la intensidad de la lluvia, la duración y la frecuencia de ocurrencia.

Para obtener el hietograma de lluvia de proyecto utilizando el método de los bloques alternados, se selecciona un periodo de retorno específico y se utiliza la curva IDF correspondiente a ese periodo. A partir de esta, se determinan las intensidades de lluvia para cada bloque de tiempo. Es importante tener en cuenta que el método de los bloques alternados es solo una de las técnicas utilizadas para la generación de hietogramas de lluvia de proyecto. Otros métodos, como el de la intensidad instantánea y el del hietograma triangular, también son utilizados en diferentes contextos. El procedimiento para el método de los bloques alternados para la lluvia de proyecto es el siguiente:

- » **Obtener el IDF:** Primero, se debe obtener la curva IDF correspondiente a la ubicación y duración del evento de lluvia deseado. Esta proporciona la intensidad de la lluvia en función de su duración y probabilidad de ocurrencia.

- » **Dividir en bloques:** Se divide la duración total del evento de lluvia en bloques de tiempo más cortos. Estos pueden ser de igual duración o de duraciones diferentes, dependiendo de la metodología utilizada.
- » **Asignar intensidades:** Para cada bloque de tiempo, se asigna una intensidad de lluvia correspondiente utilizando la curva IDF obtenida en el paso anterior. Se puede utilizar interpolación lineal para determinar la intensidad de lluvia para los bloques de tiempo intermedios.
- » **Alternar los bloques:** Luego, se alternan los bloques de tiempo asignados, de manera que los bloques con intensidades más altas se intercalan con los de intensidades más bajas. Esto se hace para simular el patrón de intensidad variable de la lluvia durante el evento.
- » **Obtener el hietograma:** Finalmente, se obtiene el hietograma de diseño al combinar todos los bloques de tiempo asignados y alternados. El hietograma muestra la secuencia temporal de las intensidades de lluvia durante el evento de lluvia de diseño.

Figura 14.*Procedimiento Método de bloques alternados*

Fuente: Instituto Flumen

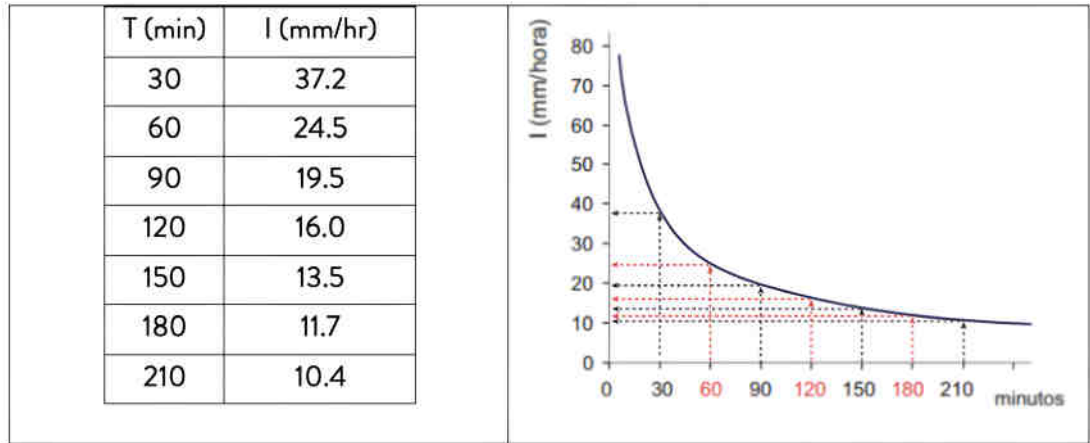


Para el ejemplo de la figura, $P_{\text{bloque 1}} = I_{15} \times 5$. En tiempo 2 Δt , 10 minutos, la lluvia máxima en esos 10 minutos es el dato de la curva IDF, un bloque de lluvia de duración 10 minutos. Pero dentro de esos 10 minutos, tenemos que los 5 minutos más desfavorables corresponden a una precipitación igual al bloque de lluvia calculado anteriormente. Luego para los segundos 5 minutos, el bloque de lluvia que incluiremos en nuestro hietograma de diseño será uno que produzca una precipitación igual a $P_{\text{bloque 2}} = I_{10} \times 10 - I_{5} \times 5$, O lo que es lo mismo, para un tiempo 3 Δt , 15 minutos, la precipitación del tercer bloque de 5 minutos de lluvia será a $P_{\text{bloque 3}} = I_{15} \times 15 - I_{10} \times 10$, o simplemente $P_{\text{bloque 3}} = I_{15} \times 15 - P_{\text{bloque 1}} - P_{\text{bloque 2}}$.

2.8 Ejemplo método de bloques alternados

El ejemplo indica que se necesita determinar una lluvia de proyecto representada en un hietograma de 3,5 horas, con intervalos de tiempo de lluvia de 30 minutos. Entonces serían 210 minutos repartidos en 7 intervalos de 30 minutos. La figura permite visualizar la curva Intensidad- Duración para un retorno de 100 años. Donde la intensidad está en (mm/h) que aparecen en las dos primeras columnas de esta tabla:

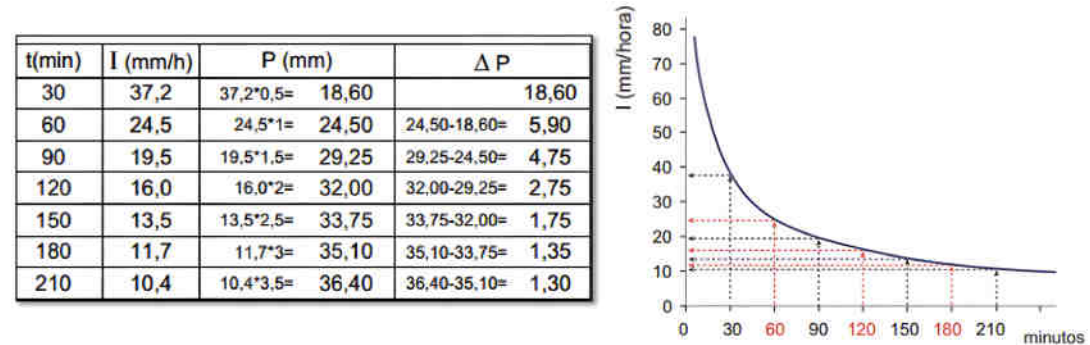
Figura 15.
Información ejemplo bloques alternados



Fuente: Instituto Flumen

Como solución al planteamiento anterior y siguiendo el procedimiento mencionado anteriormente, obtenemos:

Figura 16.
Solución ejemplo bloques alternados

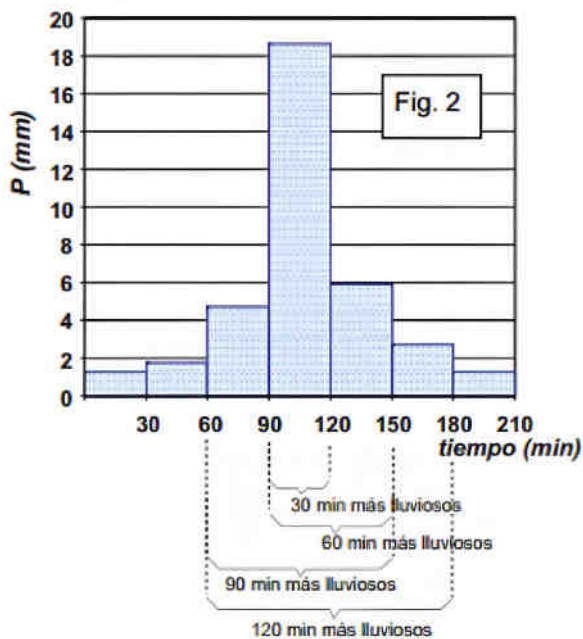


Fuente: Instituto Flumen

En la columna 3 es calculada la precipitación por cada intervalo. Para los 30 minutos se tiene que, si en media hora se tuvo una intensidad de 37,2 mm/hora, en media hora se recogió $0.5 * 37.2$. Igualmente, para el resto de los intervalos, hasta 210 minutos, (3.5 horas). Para el cálculo de la columna final (ΔP), se debe suponer que dentro de los 60 min más lluviosos están los 30 min más lluviosos y razonamos en sentido de que en los 60 min más lluviosos cayeron 24.5 mm. Si (en los 60 min anteriores) en los 30 min más lluviosos cayó 18.6 mm, en los restantes 30 min: $24,5 - 18,6 = 5,9$ mm. Igualmente, para el resto de la última columna, obteniendo la precipitación caída en incrementos de 30, en orden decreciente.

Figura 17.

Bloques alternados



Fuente: Instituto Flumen

Finalmente, el hietograma se construye usando los datos anteriores, como se muestra en la figura anterior. En el centro iría la precipitación de los 30 min más lluviosos. Posteriormente, a la derecha, se coloca la segunda precipitación más alta. A la izquierda, el que le sigue, etc.

2.9 Modelos agregados y continuos

Como se había mencionado anteriormente, la aportación a las zonas viales es determinante en el momento de cuantificar los caudales de aproximación que serán recibidos y deberán ser tratados por la estructura vial, seguramente a través de un sistema de drenaje que no ponga en peligro la seguridad vial asociada en la carretera. La cuantificación de las aportaciones a la zona vial, se determinan a través de modelos agregados, semi distribuidos, o distribuidos, según el caso u objeto del problema a desarrollar. Por ejemplo, en el caso de necesitarse cuantificar el caudal máximo necesario para el diseño de un box coulvert, seguramente será suficiente el uso de un modelo agregado, pero si se desea conocer el hidrograma de aportación a la zona de estudio, o verificar el tránsito de la creciente de aproximación, se requiere por lo menos un modelo semi distribuido. Por el contrario, si es determinar los niveles de encharcamiento ante un evento de tormenta fuerte sobre la zona vial, y adicionalmente, verificar la seguridad vial que se podría ver afectada, es necesario el uso de un modelo distribuido. De otra parte, si necesitáramos cuantificar caudales para poder determinar las aportaciones subterráneas a la zona de estudio vial, será necesario el uso de un modelo continuo, es decir, teniendo en cuenta la zona superficial, subsuperficial y subterránea.



2.9.1 Modelos agregados.

Los modelos agregados hidrológicos se caracterizan por considerar la aportación homogénea para todos los parámetros físicos e hidroclimatológicos presentes en ella. A pesar de que, en la realidad, los parámetros se diferencian espacialmente, y es evidente, por ejemplo, en el caso de tener más de una estación climática dentro de la cuenca, se halla una precipitación areal, procedimiento visto anteriormente, y lo mismo podría considerarse para cualquiera de los parámetros climáticos o morfométricos.

2.9.1.1 Método racional

La metodología racional para cálculo de caudales es una de las maneras más usadas en el mundo para tal fin, pero su uso es restringido debido a su naturaleza agregada, y a que se puede usar únicamente para cálculo de caudales máximos y superficiales, teniendo en cuenta como referencia un periodo de retorno de diseño. El período de retorno hidrológico, se refiere al tiempo promedio que transcurre entre la ocurrencia de eventos hidrológicos extremos, como inundaciones o sequías, de una determinada magnitud. Es una medida utilizada en hidrología para estimar la probabilidad de que ocurra un evento extremo en un período de tiempo determinado. En términos más simples, el período de retorno hidrológico indica cuántos años, en promedio, se esperaría que pase antes de que ocurra un evento hidrológico extremo de cierta magnitud. Por ejemplo, si se dice que un evento de inundación tiene un período de retorno de 50 años, significa que, en promedio, se espera que ocurra una inundación de esa magnitud una vez cada 50 años.

La estimación del período de retorno hidrológico se basa en datos históricos de eventos hidrológicos, como registros de caudales, precipitaciones y niveles de agua. Estos datos se utilizan para construir curvas de frecuencia, que representan la probabilidad de ocurrencia de eventos de diferentes magnitudes en función de su período de retorno. Para el método racional, el periodo de retorno se tiene en cuenta específicamente en el cálculo de la intensidad de precipitación de diseño, ya que esta depende de las curvas

IDF (intensidad duración y frecuencia), y la escogencia de la curva IDF apropiada dependerá del periodo de retorno.

Las curvas IDF (Intensidad-Duración-Frecuencia) hidrológicas son herramientas utilizadas en la hidrología para caracterizar la intensidad de la lluvia en función de su duración y frecuencia. Estas curvas son importantes para el diseño de infraestructuras hidrológicas, como sistemas de drenaje vial, alcantarillado y control de inundaciones. Las curvas IDF se obtienen a partir del análisis de registros históricos de precipitación en una determinada ubicación. A partir de estos, se calculan los valores de intensidad de lluvia máxima esperada para diferentes duraciones y frecuencias de retorno. El objetivo de las curvas IDF es proporcionar información sobre la intensidad de la lluvia que se puede esperar en una determinada ubicación durante diferentes períodos de retorno. Esto es útil para el diseño de infraestructuras hidrológicas, ya que permite estimar las condiciones de diseño para diferentes escenarios de lluvia. Es importante mencionar que las curvas IDF son específicas para cada ubicación geográfica, ya que la intensidad de la lluvia puede variar significativamente de una región a otra. Por lo tanto, es necesario realizar un análisis localizado y utilizar datos históricos de precipitación de la zona de interés para obtener las curvas IDF adecuadas. En el caso de la escogencia de la curva IDF adecuada en nuestro uso dentro de la metodología racional para cálculo de caudales superficiales, también será necesaria la determinación del tiempo de concentración de la cuenca, como se verá posteriormente.

El procedimiento de elaboración de las curvas IDF completas depende de la organización de la información de datos de precipitación de los pluviogramas de las estaciones climatológicas. Dicha información se organiza en acumulaciones cada 10 minutos para cada una de las lluvias consideradas fuertes, de cada uno de los años de registros. Posteriormente se organizan en acumulaciones de 20, 30 60, 120 y 360 minutos y se van escogiendo máximos multianuales para cada duración, para finalmente aplicar una distribución de probabilidad a los datos, normalmente Gumbel, para evaluar las probabilidades de ocurrencia de las precipitaciones convertidas a intensidad. Es un procedimiento largo, que en muchos casos y para algunas regiones que no cuentan con la disponibilidad de pluviogramas, puede hacerse complicado en el procedimiento. Por esa razón, en el mundo se han desarrollado procesos de cálculo de



curvas IDF sintéticas o regionalizadas dependiendo de las características orográficas, climatológicas y morfométricas de los países. En el caso de Colombia, se tiene el procedimiento de curvas IDF sintéticas desarrollado en el año 1998 (Vargas y Diaz-Granados, 1998). A continuación, se detalla el procedimiento para poder determinar la intensidad de diseño, a partir de la escogencia de un periodo de retorno de diseño y del tiempo de concentración de la cuenca.

La metodología sintética para elaboración de curvas IDF plantea la siguiente ecuación teniendo en cuenta la regionalización de una zona de estudio de la siguiente manera:

$$I = \frac{a * T^b * M^d}{\left(\frac{t}{60}\right)^c}$$

Donde I es la intensidad de precipitación en mm/hr, a, b c y d, significan la regionalización climática de la zona de estudio, T (años) se refiere al periodo de retorno de diseño, es decir que depende del tipo de estudio que se desea realizar, en el caso de estudios de gestión del riesgo, por ejemplo, se manejan periodos de retorno de 100 años en la mayoría de los casos, t (minutos) significa la variación de la duración para ir graficando la curva IDF, o el tiempo de concentración de la cuenca en el caso de querer determinar una intensidad de diseño, y M es la precipitación máxima promedio anual a nivel multianual de la zona de estudio en mm.

Tabla 2.
Regionalización metodología sintética (Factor M)

Región	a	b	c	d
Andina	0.94	0.18	0.66	0.83
Caribe	24.85	0.22	0.50	0.10
Pacífico	13.92	0.19	0.58	0.20
Orinoquía	5.53	0.17	0.63	0.42

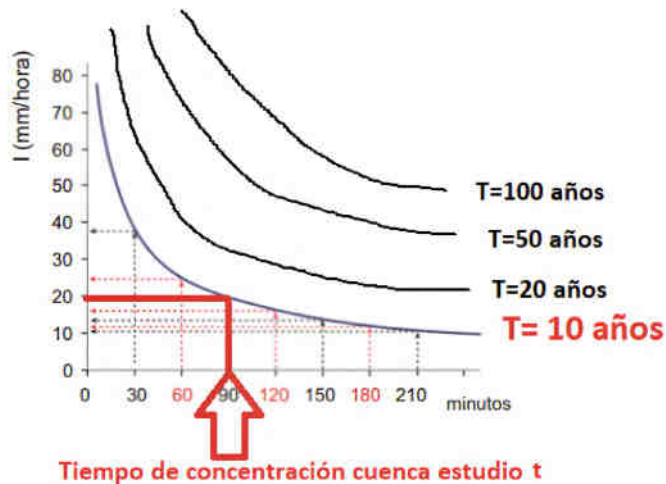
Fuente: Vargas M y Diaz G, M, 1998

A partir de una familia de curvas IDF representativas y halladas de una zona de estudio, se ingresa por el eje de las abscisas, en este caso, ya no variando la duración (t) para graficar una curva IDF representativa de un periodo de retorno, sino con el tiempo de concentración de la cuenca de estudio (para el ejemplo de la figura siguiente es 90 minutos). Posteriormente se ubica la curva IDF adecuada según el objetivo del estudio, es decir, con un periodo de retorno idóneo (T), en este caso, y para el ejemplo de la figura, se asume que se diseñará una cuneta de drenaje vial, y según el manual del INVIAS (Colombia) corresponde a 10 años.

Al cruzar el tiempo de concentración de la cuenca, con el periodo de retorno de diseño, podemos obtener la intensidad de diseño para el estudio o para el diseño respectivo en mm/hr).

Figura 18.

Ejemplo procedimiento para determinación de la intensidad de precipitación de diseño



Fuente: Autor



Otro de los parámetros definitivos en el uso del método racional es el coeficiente de escorrentía C . También conocido como coeficiente de escurrimiento, es un parámetro que indica la proporción de la precipitación que se convierte en escorrentía superficial en relación con la cantidad total de precipitación. En otras palabras, es la cantidad de agua de lluvia que fluye sobre la superficie del suelo en lugar de infiltrarse en él. Este varía dependiendo de varios factores, como la intensidad de la lluvia, la duración de la tormenta, las condiciones del suelo y la vegetación, la pendiente del terreno y el uso del suelo. Fundamentalmente, el coeficiente de escorrentía puede depender en mayor proporción al grado de permeabilidad del terreno, y su valor aumentará en la medida que tengamos coberturas más impermeables. El rango de variación del coeficiente de escorrentía está entre 0 y 1. Un suelo o cobertura totalmente impermeable, adoptará un coeficiente de escorrentía de 1, y una cobertura totalmente permeable, significará un coeficiente de escorrentía igual a 0. Es decir, un suelo muy impermeable tendrá valores de coeficiente de escorrentía altos y por ende permitirá una producción de mayor caudal superficial.

Diferentes autores han aproximado y calibrado algunos coeficientes de escorrentía para diferentes tipos de cobertura, y se presentan rangos de variación que pueden depender entre otras cosas del grado de saturación del suelo.

Tabla 3.
Algunos coeficientes de escorrentía (fuente: Aparicio, 1999)

Tipo de superficie.	Coeficiente de escorrentía.	
	Mínimo	Máximo
Zona Comercial	0.70	0.95
Vecindarios, Zonas de edificios, edificaciones densas	0.50	0.70
Zonas residenciales unifamiliares	0.30	0.50
Zonas residenciales multifamiliares espaciadas	0.40	0.60
Zonas residenciales multifamiliares densas	0.60	0.75
Zonas residenciales semiurbanas	0.25	0.40
Zonas industriales espaciadas	0.50	0.80
Zonas industriales densas	0.60	0.90
Parques	0.10	0.25
Zonas deportivas	0.20	0.35
Estaciones e infraestructuras varias del ferrocarril	0.20	0.40
Zonas suburbanas	0.10	0.30
Calles asfaltadas	0.70	0.95
Calles hormigonadas	0.70	0.95
Calles adoquinadas	0.70	0.85
Aparcamientos	0.75	0.85
Techados	0.75	0.95
Praderas (suelos arenosos con pendientes inferiores al 2%)	0.05	0.10
Praderas (suelos arenosos con pendientes intermedias)	0.10	0.15
Praderas (suelos arenosos con pendientes superiores al 7%)	0.15	0.20
Praderas (suelos arcillosos con pendientes inferiores al 2%)	0.13	0.17
Praderas (suelos arcillosos con pendientes intermedias)	0.18	0.22
Praderas (suelos arcillosos con pendientes superiores al 7%)	0.25	0.35

Fuente: Elaboración propia



Finalmente, si queremos calcular el caudal superficial por metodología racional de una zona de aportación a un punto de interés vial, aplicamos la expresión:

$$Q = C * I * A * 0.278$$

Donde Q es el caudal máximo superficial en m³/s, I es la intensidad de precipitación de diseño en mm/hr, C es el coeficiente de escorrentía de la cuenca estudio y A es el área de la cuenca aportadora o zona de aportación al punto de interés.

2.9.1.2 Método Soil Conservation Service (SCS)

El Método SCS (Soil Conservation Service) es un método hidrológico utilizado para estimar el escurrimiento superficial en cuencas hidrográficas. Fue desarrollado por el Servicio de Conservación de Suelos (SCS) del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (actualmente conocido como Servicio de Conservación de Recursos Naturales, NRCS).

El Método SCS utiliza el concepto de Número de Curva (CN) para representar la capacidad de infiltración del suelo y la retención de agua. El CN depende de las propiedades del suelo, la cobertura vegetal y las características de la cuenca. Este método se utiliza para estimar el escurrimiento superficial y calcular el volumen y la duración de la escorrentía en una cuenca hidrográfica. Es ampliamente utilizado en estudios hidrológicos y en el diseño de estructuras de control de inundaciones, como embalses y canales de desagüe. El Método SCS ha sido validado y utilizado en diferentes regiones del mundo, y en este caso, podría ser empleado igualmente para calcular aportes unitarios a puntos de interés sobre un corredor vial, por ejemplo, para cuantificar caudales a drenar sobre la corona de la vía o la dimensión de una cuneta de un talud sobre el margen de una carretera.

El número de curva, que es el principal parámetro del método, varía en función de las propiedades del suelo y la cobertura vegetal presentes en la cuenca hidrográfica o zona de aportación vial. Se obtiene mediante tablas referentes o fórmulas que consideran el tipo de suelo, la textura, la capacidad de retención de agua, la pendiente y la cobertura

vegetal. Es importante mencionar que el número de curva (CN) dependería del grado de saturación del suelo o lo que se conoce como humedad antecedente. Se explica este concepto en el sentido de que un suelo que esté seco permitirá una infiltración que dependería exclusivamente del tipo de suelo y su capacidad de infiltración. Por el contrario, si el suelo está húmedo o ha tenido o recibido aportes pluviales importantes los días anteriores o el periodo de tiempo anterior al del estudio, se consideraría que el suelo puede estar saturado y no permitiría valores importantes de infiltración, con lo cual se aumentaría considerablemente el caudal superficial que produciría la cuenca. De esta manera, el método contemplaría lo anterior a través de las siguientes expresiones.

$$Pe = \frac{(P - 0.2 * S)^2}{P + 0.8 * S}$$

Donde Pe es la precipitación efectiva o lluvia que no se infiltra, y estará en unidades de mm por unidad de tiempo, y S es el potencial de retención de agua en la cuenca, dependiente del número de curva o capacidad de infiltración del suelo, que a su vez dependerá de la condición de humedad antecedente.

$$S = 25.4 * \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right)$$

Para la anterior expresión se asumen unidades métricas, en este caso en mm. En términos generales, si se considera que un suelo tiene alta humedad antecedente, se considerará que es una condición 3. Un suelo con condición de humedad antecedente promedio se considerará como condición 2, y uno seco, se le considerará una condición 1. Una guía de acumulación de humedad dada pluviosidad sería la siguiente:



Tabla 4.

Condición de humedad antecedente en el suelo

Condición de humedad antecedente	Precipitación acumulada 5 días previos al evento
1	0-3.3
2	3.5-5.25
3	5.25

Fuente: Aparicio, 1999

Una vez definida la condición de humedad antecedente del suelo, se toman tablas de referencias, que presentan números de curva en condición promedio o condición 2.

Tabla 5.

Números de curva de referencia (CN2)

Uso del suelo o cubierta	Tratamiento o práctica	Condición Hidrológica	Grupo de suelo hidrológico			
			A	B	C	D
Barbecho	Surco recto	Mala	77	86	91	94
Cultivos en surcos	Surco Recto	Mala	72	81	88	91
	Surco Recto	Buena	67	78	86	89
	En contorno	Mala	70	79	84	88
	En contorno	Buena	65	75	82	86
	En contorno y terraceado	Mala	66	74	80	82
	En contorno y terraceado	Buena	62	71	78	81
Granos pequeños	Surco recto	Mala	65	76	84	88
	Surco Recto	Buena	63	75	83	87
	Surco Recto	Mala	63	74	82	85
	En contorno	Buena	61	73	81	84
	En contorno	Mala	61	72	79	82

	En contorno y terraceado	Buena	59	70	78	81
	En contorno y terraceado					
Leguminosas de siembra densa o praderas de rotación	Surco recto	Mala	66	77	85	89
	Surco Recto	Buena	58	72	81	85
	Surco Recto	Mala	64	75	83	85
	En contorno	Buena	55	69	78	83
	En contorno	Mala	63	73	80	83
	En contorno y terraceado	Buena	51	67	76	80
Praderas o pastizales	En contorno	Mala	68	79	86	89
	En contorno	Aceptable	49	69	79	84
	En contorno	Buena	39	61	74	80
		Mala	47	67	81	88
		Aceptable	25	59	75	83
		Buena	6	35	70	79
Praderas (permanentes)		Buena	30	58	71	78
Bosques (en predios agrícolas)		Mala	45	66	77	83
		Aceptable	36	60	73	79
		Buena	25	55	70	77
Parques, Patios			59	74	82	86

Fuente: Aparicio, 1999

Con la referencia de números de curva en condición promedio, y conociendo la humedad antecedente es decir la condición 1, 2 o 3, se procede a corregir el número de curva CN2 de referencia, aplicando la expresión correspondiente, en el caso de tener una humedad antecedente seca:

$$CN1 = \frac{CN2}{2.3 - 0.013 * CN2}$$



En el caso de tener una humedad antecedente húmeda tendríamos:

$$CN3 = \frac{CN2}{0.43 + 0.0057 * CN2}$$

Si la condición del suelo es de humedad antecedente promedio, quiere decir que podremos tomar como CN definitivo, el que corresponde a las tables de referencia. El CN definitivo será el que se usará en la determinación de la precipitación efectiva, uya expresión se dio anteriormente.

El caudal de la zona de aportación al corredor vial o punto de interés podrá calcularse entonces como:

$$Q = Pe * A$$

Teniendo en cuenta la conservación y proporcionalidad de las unidades que mantendrían coherencia.

2.9.2 Modelo continuo, como modelo semi distribuido

Un modelo hidrológico continuo es el que contempla el balance hídrico teniendo en cuenta las tres zonas del suelo: superficial, subsuperficial y subterránea, como un ciclo, donde lo que se infiltra puede llegar a volver a la superficie por vía topográfica, teniendo en cuenta la llegada del agua a la zona saturada, como un acuífero, y después siendo transportada como flujo subterráneo hacia un cuerpo de agua superficial, por ejemplo un río, conociéndose ello como flujo base. La importancia del uso de modelos continuos en la determinación de aportaciones a zonas viales radica en que, en muchos casos, se necesita el drenaje no sólo de la parte superficial de la vía o taludes, sino también de la parte subsuperficial o subterránea a través de lo que se conoce como drenes o drenajes subterráneos, y esto se logra en primera medida cuantificando los caudales provenientes de esas fuentes. Los modelos continuos pueden funcionar como

agregados o semi distribuidos en el caso de representar las aportaciones de una cuenca que son transmitidas a otra.

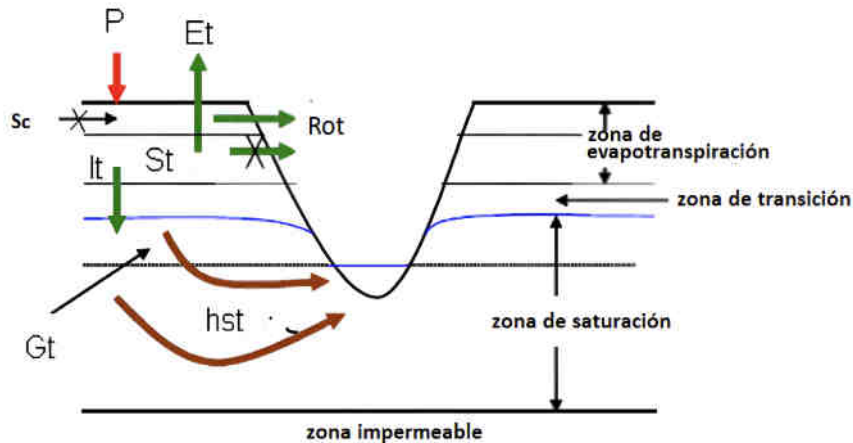
Desde el año 2002, se viene usando uno de esos modelos continuos en Colombia, en diferentes proyectos relacionados con cuantificación de flujos a zonas de interés de infraestructura. El modelo "abcd" es un modelo hidrológico desarrollado por Thomas en 1981 (Thomas, H, 1981). Este modelo se utiliza para simular el balance hídrico y los procesos hidrológicos en una cuenca hidrográfica. El acrónimo "abcd" representa diferentes componentes del modelo, que en este caso son parámetros físicos de caracterización de la zona aportante. El parámetro a es la tendencia o no, de la zona a producir escorrentía ante una lluvia, antes de que el suelo esté saturado y podría estar entre 0 y 1. El parámetro b representa un espesor representativo de humedad disponible para la evapotranspiración posible de la zona de estudio y no tiene un rango fijo de variación además de medirse en mm. El parámetro c representa el complemento que puede darse entre el flujo superficial y lo que se infiltra, e igualmente variará entre 0 y 1, y el parámetro d representa la fracción de flujo del acuífero que se transporta como flujo subterráneo y estará también entre 0 y 1.

El modelo utiliza estos componentes para estimar el balance hídrico y simular el caudal en una cuenca hidrográfica dada. Toma en cuenta factores como la precipitación, la evapotranspiración y las condiciones de humedad del suelo para predecir la respuesta del caudal a diferentes entradas hidrológicas. El modelo se ha utilizado ampliamente en estudios hidrológicos y aplicado en diversas regiones del mundo. Proporciona una representación simplificada de los procesos hidrológicos y puede ser útil para la gestión de recursos hídricos, la predicción de inundaciones y las evaluaciones de impacto del cambio climático. Es un modelo no lineal de aportación que acepta la precipitación y la evapotranspiración como entradas. Internamente, el modelo permite cuantificar la evapotranspiración real, así como el almacenamiento en acuífero y el flujo subterráneo, al igual que la infiltración o recarga. El modelo define dos Variables de estado. W_t , que implica la cantidad de recurso hídrico disponible con destino a la evapotranspiración, Y Y_t que significa la real oportunidad de evapotranspiración, a partir de la disponibilidad. Se inicia así, de la ecuación básica de continuidad a un volumen de control.



Figura 19.

Representación de un modelo continuo



Fuente: Autor

$$P_t - E_t - I_t - R_{ot} = S_t - S_{t-1}$$

$$I_t = R_{gt}$$

P_t es la precipitación durante el intervalo de tiempo t , E_t es la evapotranspiración para la parte final del periodo de estudio, I_t es la infiltración del intervalo de tiempo escogido y R_{ot} la escorrentía superficial. Igualmente, S_{t-1} es el contenido de humedad en el inicio del intervalo de tiempo t , y S_t el contenido de humedad al final del intervalo de tiempo. Entonces:

$$(P_t + S_{t-1}) - (E_t + S_t) = R_{ot} + I_t$$

$$I_t = R_{gt}$$

Donde R_{gt} es la recarga al acuífero, que según lo que asume Thomas, es igual a la infiltración, ya que desprecia el flujo subsuperficial.

El agua disponible es definida como

$$W_t = P_t + S_{t-1}$$

De otra parte:

$$Y_t = E_t + S_t$$

Donde E_t representa la evapotranspiración real en el intervalo de tiempo t y S_t representa la humedad al final del intervalo de tiempo t . La oportunidad de evapotranspiración se refleja como:

$$Y_t(W_t) = \frac{W_t + "b"}{2 \cdot "a"} - \sqrt{\left(\frac{W_t + b}{2 \cdot "a"}\right)^2 - \frac{W_t \cdot "b"}{"a"}}$$

Se entiende que $Y_t \leq W_t$. El límite superior de W_t es b . La pérdida de la humedad del suelo por evapotranspiración es proporcional a la cantidad de humedad en el suelo. Se tiene:

$$\frac{dS}{dt} = \frac{-ETP \cdot S}{b}$$

Donde ETP es la evapotranspiración Potencial. Resolviendo y asumiendo $S_{t-1} = Y_t$:

$$S_t = Y_t \cdot e^{-\frac{ETP_t}{b}}$$

También la suma de la recarga subterránea y la escorrentía superficial ($W_t - Y_t = Rot + It$) se interpreta. El parámetro “ c ” determina la cantidad de recarga subterránea $c \cdot (W_t - Y_t)$ y la escorrentía directa $(1-c) \cdot (W_t - Y_t)$, siendo una recíproca de la otra.

$$I_t = c \cdot (W_t - Y_t)$$



$$Ro_t = (1 - c). (W_t - Y_t)$$

Finalmente, el flujo subterráneo es dependiente del parámetro d , con $d. G_t$, donde d es el cuarto parámetro del modelo y G_t es el almacenamiento subterráneo al final del intervalo de tiempo t . G_t es modelado usando la ecuación de continuidad. G_t al final del periodo t es igual al almacenamiento subterráneo anterior G_{t-1} más la recarga actual, y menos el flujo subterráneo.

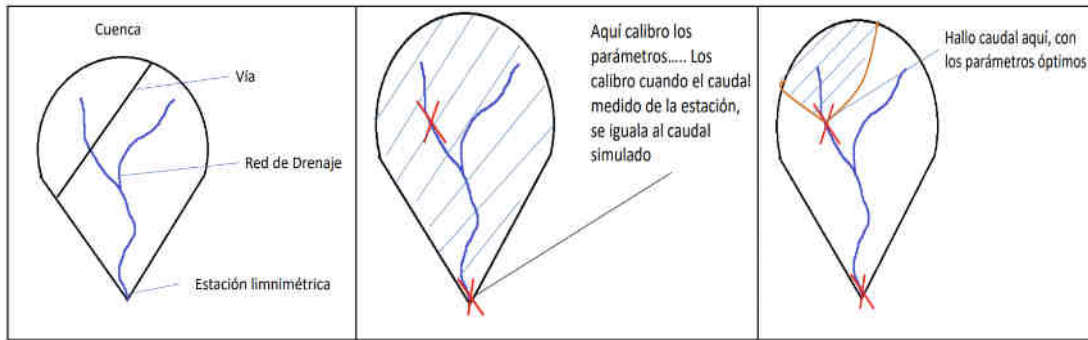
$$G_t = G_{t-1} + c. (W_t - Y_t) - d. G_t$$

El caudal total que podría llegar a un cuerpo de agua superficial, asumiendo modelo continuo, es decir uniendo el caudal superficial y el subterráneo sería:

$$Q_t = (1 - c). (W_t - Y_t) + d. G_t$$

¿Cómo funciona el modelo? Primero, se caracteriza físicamente la cuenca que contiene a las microcuenas o zonas aportantes, que contienen las zonas de estudio para diseño de las estructuras hidráulicas a diseñar, referentes al interés vial. Caracterizar físicamente la cuenca es obtener parámetros óptimos de los del modelo (a, b, c, d). Esto lo podríamos lograr a través de problema directo, es decir conociendo directamente los valores de a, b, c , y d , y si no es posible así, aplicando calibración de dichos parámetros, siempre y cuando, exista medición de caudales aguas abajo del punto de interés como salida de cuenca.

A partir de datos observados de caudal en una estación aguas abajo de la zona de interés, calibro los parámetros para ésta. Básicamente se aplicaría el modelo de Thomas en el punto de salida de la cuenca total donde está ubicada la estación limnimétrica. Los caudales obtenidos en dicho punto se comparan con los medidos por la propia estación. En principio, la similitud entre estos dos hidrogramas (medido y simulado) será seguramente mínima, y se debe empezar a cambiar cada valor de los parámetros a, b, c y d , hasta que los dos hidrogramas sean lo más parecidos posible, dicho proceso puede realizarse a través de ayudas estadísticas mediante funciones objetivo como coeficiente de determinación o coeficiente de correlación.

Figura 20.*Ejemplo de aplicación modelo continuo*

Fuente: Autor



MODELACIÓN HIDROLÓGICA DISTRIBUIDA
EN VÍAS

CAPÍTULO 3

GESTIÓN DEL RIESGO
VIAL Y APLICACIÓN DE
MODELOS HIDROLÓGICOS
SEMIDISTRIBUIDOS

CAPÍTULO 3. GESTIÓN DEL RIESGO VIAL Y APLICACIÓN DE MODELOS HIDROLÓGICOS SEMIDISTRIBUIDOS

3.1 Introducción

La gestión del riesgo y la climatología están estrechamente relacionadas, ya que el clima puede ser un factor importante en la generación y magnitud de diferentes tipos de riesgos. La climatología es el estudio científico del clima, incluyendo sus patrones, tendencias y variabilidad a lo largo del tiempo. La gestión del riesgo, por otro lado, implica identificar, evaluar y tomar medidas para reducir los riesgos y sus impactos.

La gestión del riesgo climático se centra en comprender y abordar los riesgos asociados con el clima, como inundaciones, sequías, tormentas, cambios en los patrones de temperatura, entre otros. La climatología proporciona información valiosa sobre las condiciones climáticas pasadas, presentes y futuras, lo que puede ayudar a evaluar los riesgos climáticos y desarrollar estrategias de gestión efectivas. La información climatológica puede utilizarse para identificar áreas propensas a ciertos riesgos climáticos, predecir eventos extremos y desarrollar planes de mitigación y adaptación. Por ejemplo, en el caso de una región propensa a inundaciones, la gestión del riesgo climático podría involucrar la construcción de infraestructuras resilientes, la implementación de sistemas de alerta temprana y la promoción de prácticas de uso de la tierra que reduzcan la vulnerabilidad a las inundaciones (Proyecto De “Infraestructura Resiliente Al Clima Para La Gestión Del Riesgo De Inundaciones Urbanas, 2023).

La gestión del riesgo y los patrones recientes de cambio climático también están relacionados con la planificación urbana y el desarrollo sostenible. Al comprender los riesgos climáticos a los que se enfrenta una ciudad o una región, se pueden tomar decisiones informadas sobre la ubicación de infraestructuras críticas, el diseño de edificios y la protección de ecosistemas naturales que pueden actuar como barreras naturales contra los riesgos climáticos, o como en el caso de nuestra temática, diseñar los adecuados drenajes viales que garanticen la seguridad vial.

En resumen, la gestión del riesgo y la variabilidad hidrológica son complementarias y se utilizan para entender y abordar los riesgos asociados con el clima. La información climatológica es fundamental para evaluar los riesgos climáticos y desarrollar estrategias efectivas de gestión y adaptación. Al considerar el clima en la toma de decisiones sobre la gestión del riesgo, se puede reducir la vulnerabilidad y mejorar la resiliencia frente a eventos climáticos extremos y en nuestro caso salvaguardar lo que conocemos como seguridad vial.

3.2 Resumen

La gestión del riesgo significa evaluar posibles medidas de adaptación o mitigación ante un riesgo asociado a una amenaza y vulnerabilidad existente de algún fenómeno natural que pueda llegar a afectar los bienes humanos, materiales o de infraestructura para una región. Un plan de gestión del riesgo, por tal motivo en referencia a un proyecto de infraestructura para drenaje vial, significa evaluar el riesgo asociado a las variables hidroclimatológicas que puedan incrementarse y afectar la seguridad vial por fenómenos como sobresaturación de taludes y posibles derrumbes, arrastre de material y eventos torrenciales sobre zonas viales, o posible hidroneo en la corona de las carreteras.



El concepto de riesgo implica el llamado de las variables amenaza y vulnerabilidad. El riesgo de presencia de afectación por un fenómeno extremo implica matemáticamente la multiplicación del grado de amenaza de dicho fenómeno por la vulnerabilidad asociada. De esta manera, el riesgo se incrementa, si la vulnerabilidad dada por falta de buenos diseños de la obra de infraestructura es alta. Los riesgos asociados por elevación de variables hidroclimatológicas, radica en mayor presencia de agua sobre la corona y sobresaturación de taludes aportantes. Pero otro riesgo asociado es por la llamada peligrosidad de escorrentía superficial, dada por la posibilidad de colapso de personas que caminan sobre una vía o carretera, o inestabilidad de los vehículos que circundan sobre ella.

La evaluación de la peligrosidad por escorrentía superficial es debatida por diversos autores e investigadores en todo el mundo, sin embargo, todos llegan a un punto de acuerdo, y es que depende de dos variables hidrodinámicas, la velocidad de flujo y la altura de lámina de agua. De esta manera, para algunas metodologías, la peligrosidad depende de rangos permisibles de las dos variables de manera independiente, y otros métodos requieren de la multiplicación de las dos variables en tiempos concurrentes y en el mismo píxel o elemento de malla en el caso de modelos distribuidos. Cuando dicho producto de las dos variables, supera rangos de admisibilidad, se considera que dicha zona o conjunto de elementos en la malla topográfica, son peligrosos desde lo hidrodinámico respecto a escorrentía superficial. Se logra así la clasificación de una zona o mapa potencial de inundación en categorías de alta, media o baja amenaza para diferentes propósitos, dentro de los que se encuentran las regiones o corredores de infraestructura vial.

3.3 Gestión del riesgo por inundación y sus implicaciones en infraestructura vial

La gestión del riesgo a nivel mundial es consecuencia de la toma de acciones que ayudan a mitigar daños que previamente se han dado dada la extremidad climática o natural. En Colombia, surge como consecuencia de un evento macroclimático generado. Con colaboración de la CEPAL (Comisión económica para América Latina y el Caribe), el Banco Interamericano de Desarrollo (BID), en enero de 2012, presenta un informe de valoración de daños provocado por la ola invernal dada en 2010 y 2011 (entre octubre 2010 y mayo 2011). El extremo climático de la niña se manifestó con intensas lluvias, afectando con inundaciones avalanchas y remociones en masa a varias regiones del país. La región Pacífica registró una mayor pluviosidad, casi dos veces por encima de lo normal en años anteriores. El fenómeno de la Niña es un evento climático que ocurre en el Océano Pacífico tropical. Consiste en el enfriamiento anormal de las aguas ecuatoriales del océano, lo cual influye en las condiciones climáticas en muchas partes del mundo. Durante la Niña, las temperaturas del océano a lo largo de la mitad oriental del Pacífico tropical se enfrían, lo que provoca cambios en los patrones climáticos. Esta fase del fenómeno puede tener diferentes efectos en diferentes regiones del mundo. Algunas de las características asociadas con esta incluyen bajas temperaturas, fuertes sequías en las zonas costeras del Pacífico y lluvias más intensas en otras regiones, en el caso de Colombia, significa altas precipitaciones.

En el periodo comprendido entre octubre de 2010 y mayo de 2011, Colombia experimentó una fuerte temporada de lluvias. Estas lluvias intensas causaron daños significativos en varias regiones del país, incluyendo inundaciones, deslizamientos de tierra y afectaciones en infraestructuras y cultivos. El fenómeno de la Niña en 2010 en Colombia fue catalogado como uno de los peores desastres naturales en la historia del país. Se estima que millones de personas resultaron afectadas y hubo pérdidas significativas en términos económicos, sociales y ambientales. El gobierno colombiano, en colaboración con organizaciones internacionales y entidades locales, realizó esfuerzos para hacer frente a los impactos de este fenómeno. Se implementaron medidas de prevención, respuesta y recuperación para mitigar los efectos de las inundaciones y brindar apoyo a las comunidades afectadas.



Con la elaboración por parte del Banco Interamericano de Desarrollo (BID), en enero de 2012, del informe de valoración de daños provocado por la ola invernal dada en 2010 y 2011 (entre octubre 2010 y mayo 2011), se produce la exposición de una necesidad urgente en cuanto a reglamentación de los procedimientos de prevención de los efectos de efectos macroclimáticos en Colombia. La Ley 1523 de 2012 en Colombia, adopta la política nacional de gestión del riesgo de desastres y establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres. Esta ley tuvo como objetivo formular, ejecutar, dar seguimiento y evaluar políticas, estrategias, planes, programas, regulaciones, instrumentos, medidas y acciones permanentes para el conocimiento y la reducción del riesgo, así como para el manejo de desastres.

La gestión del riesgo de desastres es un proceso social orientado a contribuir a la seguridad, el bienestar y la calidad de vida de las personas, así como al desarrollo sostenible. Esta ley establece los principios, responsabilidades y definiciones relacionadas con la gestión del riesgo, y crea el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres para coordinar las acciones y esfuerzos en esta materia.

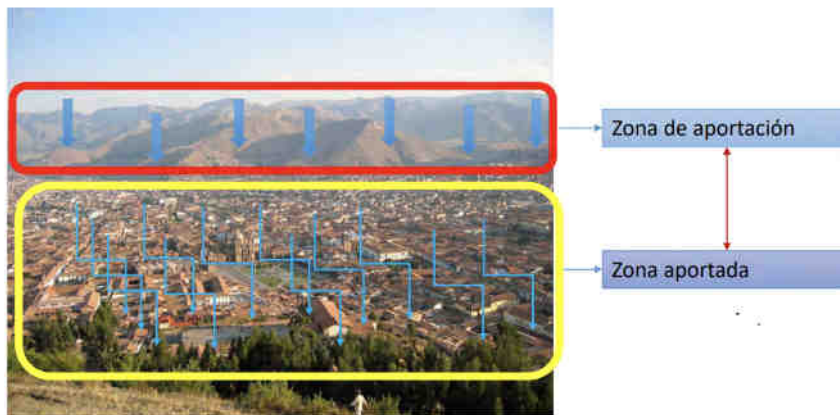
La Ley 1523 de 2012 también estableció que el presidente de la República puede declarar la existencia de una situación de desastre y clasificarla según su magnitud y efectos. Además, esta ley contempla la financiación de las acciones de gestión del riesgo de desastres. Adicionalmente y como complemento a la ley de gestión del riesgo, en el año 2014 se aprueba en el congreso de la república de Colombia, el decreto 1807 del 19 de septiembre del año 2014, con lo cual se enfatizan los aspectos técnicos que derivan en infraestructuras que permitirán dar cumplimiento a la gestión del riesgo en todo el territorio nacional, y que tendrán mayoritariamente influencia en obras de infraestructura vial en el país.

3.4 Implicaciones de la aplicación de la gestión del riesgo en el diseño vial

La concepción de amenaza por inundación debe incluir una serie de pasos conceptuales hidrológicos que derivan en la caracterización hidráulica de la zona estudio. Lo primero a tener cuenta es la delimitación de dos tipos de estudio necesarios para poder determinar zonas inundables, antes de caracterizar el nivel de peligrosidad: una fase hidrológica y una hidrodinámica. La fase hidrológica se entiende como una modelación agregada o semidistribuida, donde se cuantifican las aportaciones que entrarían, en este caso a la zona de estudio vial. Y una segunda, incluiría un estudio hidrodinámico, donde se cuantifica el comportamiento de los flujos sobre las calles o infraestructura vial, en referencia a alturas de lámina de agua y velocidades, con el fin de verificar posibles peligrosidades viales.

Figura 21.

Ejemplificación de zona aportadora y aportada

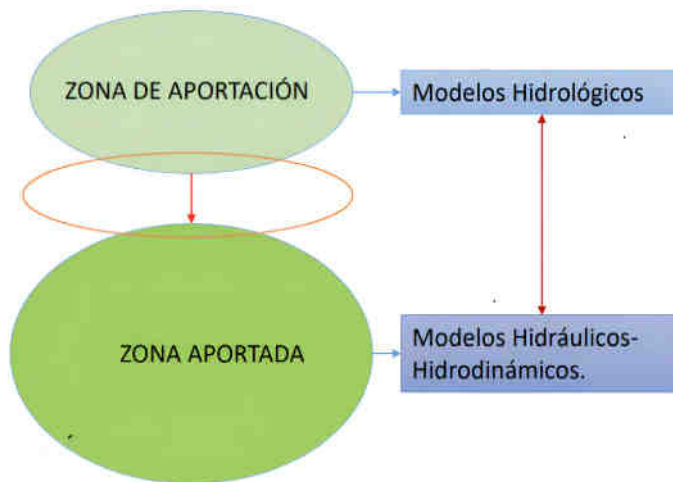


Fuente: Autor

La zona donde se evalúan los aportes hidrológicos podría considerarse como región aportadora, y la zona donde se evaluará la posible peligrosidad como una zona o región aportada. En la zona aportadora se da la interacción o análisis de lo que sucede con la precipitación, variables climáticas y tipo de suelo o permeabilidad. En la aportada será importante la caracterización de flujo y su transporte cuantificado de manera hidrodinámica. En este capítulo, abordaremos de una forma general pero clara, las herramientas adecuadas para crear un plan de acción en la búsqueda de la información. Estrategias como la caracterización y definición, la cobertura, la refinación, la ejecución y el almacenamiento, permitirán recolectar más información y de mejor calidad que ayuden a brindar una investigación útil, que responda a las necesidades del entorno.

Figura 22.

Conceptualización de modelo hidrológico e hidrodinámico en interacción vial



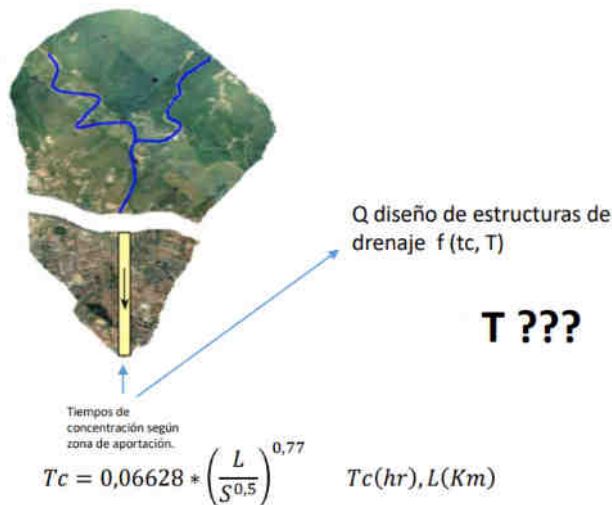
Fuente: Autor

Es importante tener en cuenta que la zona de aportación contempla la evaluación del caudal hidrológico a partir de variables hidroclimatológicas que representan el tipo de cuenca o aporte a la zona de interés. Dos de las variables más representativas en este proceso son el tiempo de concentración y el periodo de retorno. La primera, ayuda en la escogencia del periodo de retorno de diseño en las curvas IDF, dependiendo del tipo de estructura de drenaje vial a diseñar.

Periodos de retornos del sistema de drenaje apropiados desde el punto de vista económico y de diseño son de 20 a 25 años, en el caso de estructuras de drenaje convencional como alcantarillados. En el caso de drenaje vial dependería del componente vial que se esté tratando. Según el INVIAS (Colombia), y su manual de drenaje para carreteras, las cunetas deben tratarse con un periodo de retorno de diseño de 5 años, una alcantarilla, un periodo de retorno entre 10 a 20 años, dependiendo de su diámetro, o un puente, un periodo de retorno entre 20 y 50 años dependiendo de su luz.

Figura 23.

Ejemplificación de la importancia del tiempo de concentración y periodo de retorno



Fuente: Autor



Desde inicios del milenio, han sido imaginadas numerosas técnicas, denominadas alternativas o compensatorias, o sistemas de drenaje urbano sostenible (SUDS), todas sobre una misma filosofía: Tratar de aproximarse lo más posible al ciclo natural del agua. Alternativas como techos verdes, fachadas verdes, cunetas verdes o depósitos temporales de retención traen como ventajas la reducción de caudales pico, reducción de las masas de contaminantes desechados, desarrollo de nuevos espacios «naturales» en la ciudad. Las prácticas de diseño urbano mencionadas anteriormente, reducen la diferencia entre eventos de precipitación con periodos de retorno T mayores y los periodos de retorno de diseño de las obras de infraestructura en drenaje vial. Sin embargo, en muchos casos, no es suficiente y se necesitan sistemas de apoyo con elementos del propio diseño urbano. Una solución posible son los sistemas duales, donde se usan las calles como canales hidráulicos, y compensan las diferencias entre periodos de diseño de lluvias extremas, con periodos de retorno de diseño.

Sin embargo, el caudal de exceso debe satisfacer ciertas características en cuanto a velocidad de flujo y altura de lámina de agua sobre las calles, aplicándose el concepto de seguridad vial como respuesta a variables dependientes de la gestión del riesgo por inundación. En otras palabras, sobre las calles, ciertos caudales que pasan las coronas de la vía podrían llegar a ser muy peligrosos para la vida humana, por la velocidad de flujo o por la combinación de esta velocidad con la altura de lámina.