



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

ESTIMACIÓN DE LA AMENAZA POR DÉFICIT HÍDRICO EN ACUEDUCTOS MUNICIPALES CON PROBLEMAS DE ABASTECIMIENTO EN CALDAS

Alejandro Marulanda Aguirre
Ing. Civil Esp. Ingeniería Hidráulica y Ambiental.
Maestría en Ingeniería - Recursos Hidráulicos.

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de ingeniería y arquitectura.

Manizales, Colombia

2017

ESTIMACIÓN DE LA AMENAZA POR DÉFICIT HÍDRICO EN ACUEDUCTOS MUNICIPALES CON PROBLEMAS DE ABASTECIMIENTO EN CALDAS

ESTIMATION OF THE HAZARD FOR WATER DEFICIT IN MUNICIPAL AQUEDUCTS WITH PROBLEMS OF SUPPLY IN CALDAS

Alejandro Marulanda Aguirre

Tesis o trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de:

Magíster en Recursos Hidráulicos

Director (a):

Ph.D. Jorge Julián Vélez Upegui

Codirector (a):

Msc. Olga Lucía Ocampo López

Línea de Investigación:

Hidrología

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de ingeniería y arquitectura.
Manizales, Colombia

2017

“Cuando el pozo está seco, reconocemos el verdadero valor del agua.” Benjamin Franklin

“La virtud es una disposición voluntaria adquirida, que consiste en un término medio entre dos extremos malos, el uno por exceso y el otro por defecto”. Aristóteles.

“El agua es el elemento y principio de las cosas, el Arjé.” Tales de Mileto.

“El agua es la fuerza motriz de toda la naturaleza.” Leonardo da Vinci.

“Si no quieres repetir el pasado, estúdialo.” Baruch Spinoza.

“El mundo real es mucho más pequeño que el de la imaginación.” Friedrich Nietzsche.

“No es más fuerte ni el más inteligente, ni el que sobrevive, sino aquel que más se adapta a los cambios.” Charles Darwin.

“Aunque no podamos elegir lo que nos pasa, podemos en cambio elegir lo que hacer frente a lo que nos pasará.” Fernando Savater.

“El que haya encontrado la naturaleza y no se haya asombrado ante ella, no merece vivir.” Augusto Ángel Maya.

Agradecimientos

A mis seres queridos por el apoyo y la paciencia.

Al alma mater y directores de tesis por ser inspiración en el crecimiento académico y profesional.

A Caldas y Manizales como laboratorios permanentes del Patrimonio Hídrico.

A la constancia y amor por la ciencia que impulsó esta actividad con gran voluntad, esfuerzo y supremo altruismo.

Resumen

Las temporadas invernales han generado impactos evidentes en el departamento de Caldas, Colombia; mientras que las temporadas secas no han sido consideradas una problemática de riesgo hidroclimatológico, producto de la paradoja de tener un territorio con excedentes hídricos. Los efectos del ENSO, Oscilación del Sur El Niño, en su fase cálida ha comprometido el abastecimiento de poblaciones municipales en Caldas debido a la reducción de caudales, generando impactos económicos, ambientales y sociales. El objetivo del presente trabajo es estimar la amenaza por déficit hídrico en acueductos municipales con problemas de abastecimiento del departamento de Caldas bajo el contexto de variabilidad y cambio climático. La metodología empleada considera la modelación hidrológica con series climáticas históricas y futuras para los análisis de sequía meteorológica por medio del Índice de Precipitación y Evapotranspiración estándar (SPEI), evaluación de curvas de recesión, estimación probabilística de caudales mínimos y análisis de sensibilidad de diferentes variables objeto de estudio. Los resultados permiten identificar la magnitud, frecuencia y duración de caudales en épocas de estiaje y en contraste con la demanda, definir escenarios de desabastecimiento en acueductos municipales de Salamina, La Merced y Norcasia. Las conclusiones permiten identificar el déficit en la oferta hídrica para el abastecimiento de los acueductos, reconocer la recurrencia de tales eventos y caracterizar las sequías meteorológicas que, producto del rezago respecto a la sequía hidrológica, permitirá adoptar medidas de adaptación y mitigación, acabando con el ciclo hidro-ilógico del agua.

Palabras clave: Déficit hídrico, desabastecimiento, sequía, recesión, acueducto, hidrología, SPEI.

Abstract

Wet seasons have generated evident impacts in Caldas, Colombia. El Niño Southern Oscillation (ENSO) determines the climatic regime of extreme events accentuated by climate change. The territory presents deficit in the middle of water excess. The ENSO effects in dry phase have compromised the supply of municipal aqueducts due to the reduction of flows, generating economics, environmental and social impacts. The objective is to estimate the hazard of water deficit in municipal aqueducts with supply problems in the Caldas under the context of variability and climate change. The methodology considers hydrological modeling with historical and future climate series for the water supply analysis, evaluation of recession curves, probabilistic estimation of low flows, meteorological drought analysis through the Standardized Precipitation and Evapotranspiration Index (SPEI) and sensitivity analysis of different variables. The results have allowed the identification of the magnitude, frequency and duration of low flows in times of drought and in contrast to the demand, allow define scenarios of shortages in municipal aqueducts of Salamina, La Merced and Norcasia. The conclusions allow identify the deficit in water supply of aqueducts, recognize the recurrence of such events and characterize the meteorological droughts that, as a result of the lag with the hydrological drought, will allow adopting adaptation and mitigation measures, ending the hydro-illogical water cycle.

Keywords: Water deficit, scarcity, drought, recession, aqueduct, hydrology, SPEI.

Contenido

Resumen	IX
Abstract	X
Lista de figuras	XIII
Lista de tablas	XVII
Lista de Símbolos y abreviaturas	XIX
1 Introducción	1
1.1 Área de estudio	6
1.2 Alcance	7
2 Objetivos y justificación	11
2.1 Objetivos	11
2.1.1 Objetivo general.....	11
2.1.2 Objetivos específicos	11
2.2 Justificación.....	12
2.2.1 Interés	12
2.2.2 Novedad	12
2.2.3 Utilidad	12
3 Antecedentes	13
3.1 Generalidades.....	13
3.2 El Ciclo del Agua.....	15
3.3 Clima.....	18
3.3.1 Variabilidad climática.	19
3.3.2 Cambio climático	23
3.4 Sequía.....	26
3.4.1 Conceptos	26

3.4.2	Tipos de Sequía	27
3.4.3	Impactos.....	31
3.4.4	Índices de sequía	33
3.4.5	Gestión de sequías	39
3.4.6	Diferencia entre sequía y desertificación	44
3.4.7	Desabastecimiento y Racionamiento hídrico	47
3.4.8	Contexto mundial	51
3.4.9	Contexto Latinoamericano.....	53
3.4.10	Contexto país – Colombia	54
3.4.11	Contexto regional – Departamento de Caldas	58
3.5	Modelación hidrológica	61
3.5.1	Tipos de modelos	62
3.5.2	Modelación de caudales para extremos mínimos	66
3.6	Referente normativo	67
4	Metodología.....	70
4.1	Estimación del déficit hídrico bajo condiciones de variabilidad climática	71
4.2	Efectos futuros por cambio climático en la oferta hídrica.....	71
4.3	Análisis de sensibilidad para la Gestión Integral del Recurso Hídrico	72
5	Resultados	73
5.1	Estimación del déficit hídrico a partir de modelación hidrológica	73
5.1.1	Recopilación, y análisis información temporal	73
5.1.2	Recopilación y análisis de información espacial	76
5.1.3	Modelación hidrológica: Calibración, validación y simulación	80
5.1.4	Estimación y análisis de índices hídricos.....	99
5.2	Efectos futuros por cambio climático en la oferta hídrica.....	100
5.2.1	Selección de modelos de cambio climático	100
5.2.2	Análisis de línea base.....	101
5.2.3	Estimación condiciones futuras	101
5.3	Análisis de sensibilidad para la Gestión Integral del Recurso Hídrico	105
5.3.1	Simulación hidrológica escenarios deseados	105
5.3.2	Análisis de sensibilidad referente a coberturas vegetales.....	107
5.3.3	Análisis de sensibilidad referente a uso del suelo.....	108
5.4	Análisis de Incertidumbre.....	110
5.4.1	Incertidumbre espacial y temporal en información climática	110
5.4.2	Incertidumbre en la modelación hidrológica.....	110
5.4.3	Incertidumbre en resultados obtenidos.....	111
6	Conclusiones, recomendaciones y trabajos futuros.....	112
6.1	Conclusiones	112
6.2	Recomendaciones	115
6.3	Trabajos futuros	115
A.	Anexo: Índices e indicadores para la sequía	117
B.	Anexo estaciones de precipitación, temperatura, humedad relativa, brillo solar y caudal	120
	Bibliografía	133

Lista de figuras

Figura 1.	Subregiones departamento de Caldas.	2
Figura 2.	Omar Franco Torres. IDEAM, 2013.....	2
Figura 3.	Recortes de prensa que evidencian un problema.	3
Figura 4.	Municipios en riesgo de desabastecimiento hídrico.	3
Figura 5.	Área de estudio, Departamento de Caldas.....	6
Figura 6.	Delimitación de áreas abastecedoras de acueductos.	7
Figura 7.	Municipios con desabastecimiento hídrico durante el año 2016 y relación oferta/demanda, información suministrada por las empresas prestadoras del servicio de acueducto en Caldas.	8
Figura 8.	Municipios con racionamiento hídrico – 2016.	8
Figura 9.	Mapas globales de (a) precipitación media anual (mm); (B) el coeficiente de variación de la precipitación anual (%) y (c) la probabilidad (%) de la precipitación anual en cualquier año que sea inferior al 75% del valor anual medio a largo plazo.	14
Figura 10.	Relación extracción vs disponibilidad hídrica mundial.....	15
Figura 11.	Ciclo del agua.....	16
Figura 12.	Localización del agua en el planeta Tierra.	17
Figura 13.	Interacción de subsistemas.	17
Figura 14.	Escalas temporales del clima.....	18
Figura 15.	Oscilaciones climáticas que intervienen en Colombia.....	22
Figura 16.	(izq) Anomalía del promedio global de temperaturas en superficie, terrestres y oceánicas. (der) Promedio global del cambio del nivel del mar. (centro) Promedio global de concentraciones de gases de efecto invernadero.	23
Figura 17.	Evidencias de cambio climático en Glaciares Andinos.....	24
Figura 18.	Emisiones antropógenas de CO ₂ anuales.	24

Figura 19.	Poca representación de la variabilidad para eventos extremos.....	25
Figura 20.	Propagación de la precipitación a través de distintos componentes y propagación de la sequía meteorológica sobre la sequía hidrológica.	29
Figura 21.	Relación entre varios tipos de sequía y la duración de los eventos.....	29
Figura 22.	Comparativo entre SPI y SPEI.....	36
Figura 23.	Resultado de SPEI frente a caudales y reservorios en la cuenca del Tajo, España.....	36
Figura 24.	Interacción de la sequía y los componentes del riesgo.....	40
Figura 25.	Ciclo de la gestión de desastres.....	41
Figura 26.	Ciclo hidro-ilógico.	41
Figura 27.	Indicadores combinados de sequía para tomadores de decisiones.....	42
Figura 28.	Enfoque de la gestión del riesgo por sequía.	42
Figura 29.	Mapa del Portal Global de Sequía, NOAA.	43
Figura 30.	Monitor Global de Sequía por SPEI.	43
Figura 31.	Resultados SPEI para 1 y 3 meses para la ciudad de Manizales.....	44
Figura 32.	Mapa global de zonas áridas.	46
Figura 33.	Comparativo entre el IA y el IRH para Colombia.	55
Figura 34.	Municipios afectados por desabastecimiento y racionamiento por fenómeno ENSO en su fase seca entre el 2014 y el 2016.....	56
Figura 35.	Evolución El Niño 2015-2016 en Colombia.	56
Figura 36.	Afectación de municipios con desabastecimiento por El Niño entre el periodo Oct-2014 a Mar-2016	57
Figura 37.	Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico.....	58
Figura 38.	Máxima magnitud para diferentes escalas temporales del SPI.	59
Figura 39.	Acueductos con problemas de abastecimiento en Caldas.....	60
Figura 40.	Análisis histórico de caudales y recesión – Aguas de Manizales.....	60
Figura 41.	Serie de lluvia y caudal.....	61
Figura 42.	Modelos agregados.	62
Figura 43.	Modelos distribuidos.....	62
Figura 44.	Modelos determinísticos.....	62

Figura 45. Modelos estocásticos.....	62
Figura 46. Modelos hidrológicos.....	63
Figura 47. Modelos utilizados en la cuenca del río Chinchiná, Caldas.....	64
Figura 48. Esquema conceptual del modelo de tanques.....	64
Figura 49. Conceptualización del modelo TETIS.....	65
Figura 50. Envolvente mínima de caudales – Río Medellín, t= 10 días.....	67
Figura 51. Evolución normativa de la GRD en Colombia.....	69
Figura 52. Esquema de la metodología planteada para estimar la amenaza por déficit hídrico.....	70
Figura 53. Series históricas precipitación estaciones aeropuerto Santágueda (IDEAM) y Cenicafe (mm) periodo 1981-2010.....	73
Figura 54. Mapa de estaciones para precipitación, temperatura, humedad relativa y brillo solar en Caldas.....	74
Figura 55. Gráficas de doble masa.....	75
Figura 56. Polígonos de Thiessen para las variables precipitación, temperatura, humedad relativa y brillo solar.....	76
Figura 57. Elementos cartográficos base.....	77
Figura 58. Cartografía oficial.....	77
Figura 59. Mapas utilizados en el análisis de sensibilidad.....	78
Figura 60. Estación La Paila.....	81
Figura 61. Estación Puente Juntas.....	82
Figura 62. Estación Costa Azul.....	82
Figura 63. Estación Quitasueño – Arma.....	84
Figura 64. Estación Sonsón – Arma.....	85
Figura 65. Estación Puente carretera – Guarinó.....	86
Figura 66. Balance diario (Chagualito).....	87
Figura 67. Balance mensual (Chagualito).....	88
Figura 68. Balance Anual (Boquerón).....	88
Figura 69. Balance Mensual Multianual (El Uvito).....	88
Figura 70. Caudal en condiciones normales y bajo El Niño – El Uvito.....	89

Figura 71.	Estimación del SPEI – 1 mes sobre el ábaco de Montebello – Norcasia.	90
Figura 72.	Resultados SPEI para el ábaco de Las Pavas – Norcasia.....	90
Figura 73.	Curva de duración de caudales – El Uvito.	92
Figura 74.	Curvas de recesión a escala logarítmica – municipio de La Merced. ...	93
Figura 75.	Caudales mínimos La Virgen.	94
Figura 76.	Curvas de duración de caudales – Salamina.....	95
Figura 77.	Curvas de duración de caudales – La Merced.....	96
Figura 78.	Curvas de duración de caudales – Norcasia.	97
Figura 79.	Comparativo de la oferta y la demanda hídrica.	98
Figura 80.	Curvas Doble masa (izquierda) y registros reales frente a los simulados (derecha).	101
Figura 81.	Tanques iniciales objeto de análisis.	106

Lista de tablas

Tabla 1.	Municipios en Caldas con alerta por desabastecimiento.	3
Tabla 2.	Impactos asociados a diferentes sectores.	32
Tabla 3.	Impactos por sectores.....	33
Tabla 4.	Comparación de índices para sequía a través de evaluación multi-criterio.	34
Tabla 5.	Clasificación SPI McKee.	34
Tabla 6.	Clasificación SPI NASA.....	35
Tabla 7.	SPI, Índice Z de Palmer, y PDSI de acuerdo a Heim (2002).....	39
Tabla 8.	Pérdidas de vidas humanas y económicas por sequía.....	40
Tabla 9.	Diferencias entre la aridez y la sequía.....	45
Tabla 10.	Acciones de respuesta frente a la escasez.	50
Tabla 11.	Parámetros de recesión para diferentes regiones.....	66
Tabla 12.	Entidades con estaciones de precipitación.	73
Tabla 13.	Caracterización geomorfológica y fisiográfica.	79
Tabla 14.	Parámetros de calibración.....	80
Tabla 15.	Balance hídrico anual ábacos municipales objeto de estudio.....	87
Tabla 16.	Relación caudales mínimos y ONI.	89
Tabla 17.	Curva de duración de Caudales – El Uvito:.....	92
Tabla 18.	Análisis probabilístico de caudales mínimos – Ábaco La Virgen - Norcasia.	94
Tabla 19.	Resultados amenaza integrada acueducto municipal Salamina.	95
Tabla 20.	Resultados amenaza integrada acueducto municipal La Merced.	96
Tabla 21.	Resultados amenaza integrada acueducto municipal Norcasia.	97

Tabla 22.	Resultados de los indicadores promedio por municipio.	99
Tabla 23.	Resultados del análisis futuro, Salamina.....	101
Tabla 24.	Resultados del análisis futuro, La Merced.....	102
Tabla 25.	Resultados del análisis futuro, Norcasia.	103
Tabla 26.	Parámetros de calibración máximos y mínimos recomendados.	106
Tabla 27.	Resultados medios de los parámetros objeto de análisis de sensibilidad.....	106
Tabla 28.	Resultados máximos de los parámetros objeto de análisis de sensibilidad.....	107
Tabla 29.	Resultados mínimos de los parámetros objeto de análisis de sensibilidad.....	107
Tabla 30.	Resultados análisis de sensibilidad.....	108
Tabla 31.	Índices e indicadores meteorológicos.	117
Tabla 32.	Índices e indicadores de humedad del suelo.	118
Tabla 33.	Índices e indicadores por hidrología.....	118
Tabla 34.	Índices e indicadores por sensores remotos.	118
Tabla 35.	Índices e indicadores compuestos o modelados.....	119
Tabla 36.	Estaciones de precipitación.....	120
Tabla 37.	Estaciones de Temperatura.	128
Tabla 38.	Estaciones humedad relativa.....	129
Tabla 39.	Estaciones brillo solar.....	130
Tabla 40.	Estaciones de caudal.	131

Lista de Símbolos y abreviaturas

Abreviaturas

Abreviatura Término

ÁBACO	Área Abastecedora de Acueducto Comunitario
AMSR-E	Advanced Microwave Scanning Radiometer for EOS.
CAZALAC	Centro del Agua para Zonas Áridas de Latinoamérica y el Caribe.
CGIAR	Research Centers in Southeast Asia
DEWS	Drought Early Warning Systems.
DRM	Drought Risk Management.
ENSO	El Niño Southern Oscillation.
ERA	Evaluación Regional del Agua.
EWS	Early Warning Systems.
FAO	Food and Agriculture Organization.
GEI	Gases Efecto Invernadero
GRACE	Gravity Recovery and Climate Experiment
FDAA	Federal Disaster Assistance Administration.
FUST	Flanders UNESCO Science Trust Fund.
GDMP	Global Drought Monitor Portal.
GWP	Global Water Partnership.
ICIWaRM	International Center for Integrated Water Resource Management.
IDEAM	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia.
IDMP	Integrated Drought Management Programme.
IPCC	Panel Intergubernamental de Cambio Climático.
IRI	International Research Institute for Climate and Society.
IRIMO	Islamic Republic of Irán Meteorological Organization.
MAVDT	Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, Colombia.
MCG	Modelos de Circulación Global.
MINAMB	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, anterior área del MAVDT, Colombia.
MJO	Madden Julian Oscillation.
MWAR-LAC	Managing Water Resources in semi-Arid Regions of Latin America and Caribbean.

XX Estimación de la amenaza por déficit hídrico en acueductos municipales con problemas de abastecimiento en Caldas.

MODIS Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
NIDIS National Integrated Drought Information System.
NOAA National Oceanic and Atmospheric Administration.
OMM Organización Meteorológica Mundial. (WMO en inglés)
PHN Plan Hídrico Nacional.
PNGIRH Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico.
RALCEA Red Latinoamericana de Centros de Conocimiento de Gestión de Recursos Hídricos.
RCP Trayectorias de Concentración Representativa.
SLWRM Sustainable Land and Water Resources Management.
TRMM Tropical Rainfall Measuring Mission.
UNGRD Unidad Nacional Para la Gestión del Riesgo de Desastres, Colombia.
WMO World Meteorological Organization. (OMM en español).
ZCIT Zona de Confluencia Inter Tropical

ÍNDICES

IA Índice de Aridez.
ICDI Integrated Climatological Drought Indicator
ICP Índice de Concentración de Precipitación.
IFM Índice de Fournier Modificado.
IPE Índice de Presión sobre los Ecosistemas.
IRH Índice de Retención y Regulación Hídrica.
IUA Índice de Uso de Agua.
IVH Índice de Vulnerabilidad Hídrica al Desabastecimiento.
NAO Oscilación del Atlántico Norte
ONI Oceanic Niño Index
ORL Radiación de Onda Larga Saliente
PDF Probability Density Function.
PDSI Palmer Drought Severity Index
QBO Oscilación Cuasi bienal
SOI Southern Oscillation Index
SPI Standardized Precipitation Index.
SPEI Standardized Precipitation and Evapotranspiration Index.
SWSI Surface Water Supply Index.

1 Introducción

La región tropical andina suele estar expuesta a diferentes oscilaciones climáticas que condicionan su dinámica bimodal bajo dos escenarios; temporada invernal y seca. La anomalía generada sobre dos de los componentes fundamentales en el ciclo hidrológico, temperatura y precipitación, genera gran impacto en todas las actividades sociales, agrícolas, culturales, ambientales, productivas, entre otras. Los escenarios de sequía generados por la presencia del ENSO (El Niño Southern Oscillation) o también conocido como “El Niño” se ven acentuados por condiciones de cambio climático, la pérdida de ecosistemas naturales, el aporte de mayores cargas contaminantes antrópicas y naturales, cambios en los usos del suelo, prácticas agrícolas agresivas, deforestación a raíz de la extensión de fronteras agropecuarias y finalmente condiciones geológicas, geomorfológicas y fisiográficas de algunas regiones contribuyen a incrementar la amenaza por desabastecimiento hídrico de poblaciones (FAO, 2009) (IDEAM, 2009) (IDEAM, 1997) (CORPOCALDAS & Velásquez, 2015) (Ocampo López, 2017). Las condiciones desfavorables en cuanto al estado de infraestructura, baja capacidad operación, malas políticas administrativas y financieras y bajo control en el uso eficiente y racional del patrimonio hídrico, entre otras, constituyen otro factor relativo a vulnerabilidad que no es objeto de la presente investigación. La anomalía de las variables climáticas citadas anteriormente (temperatura y precipitación) hacen parte primordial en los análisis integrales de riesgo por desabastecimiento que se consideran como propuesta para fases posteriores una vez se integre la vulnerabilidad.

El departamento de Caldas se encuentra localizado en el centro occidente de la región andina, se encuentra bañado por los ríos Magdalena y Cauca en sus costados occidental y oriental respectivamente y cuenta con la cadena montañosa andina central sobre la cual se localiza el Parque Nacional Natural Los Nevados. Su capital es la ciudad de Manizales y cuenta con otros 26 municipios integrados en 6 subregiones denominadas

Alto Occidente, Bajo Occidente, Norte, Centro-sur, Alto Oriente y Magdalena Caldense con la distribución que se muestra en la 0.



Fuente: Gobernación de Caldas.

La afirmación realizada por Omar Franco Torres del IDEAM durante el 2013 revela algún problema con el patrimonio hídrico en Colombia (Figura 2), mientras que la Figura 3 muestra los reportes llevados a cabo por parte de diarios nacionales y locales referente al desabastecimiento en Caldas.

Figura 2. Omar Franco Torres. IDEAM, 2013.
“Creíamos que Colombia era el país más rico en agua y no hay tal”



Fuente: El Universal, 2013.

Figura 3. Recortes de prensa que evidencian un problema.



Fuente: Caracol Radio, RCN Radio, El Espectador, La Patria, W Radio, Eje 21.

El pasado 05 de diciembre del año 2014, el IDEAM indicó, mediante boletín de prensa, que existía entre un 70% y 75% de probabilidad de que se consolide un episodio de “El Niño”. Así mismo generó la alerta para 9 municipios de Caldas por desabastecimiento relacionados en la Tabla 1 y la Figura 4.

Figura 4. Municipios en riesgo de desabastecimiento hídrico.**Tabla 1.** Municipios en Caldas con alerta por desabastecimiento.

103	AGUADAS
104	FILADELFIA
105	LA MERCED
106	MANZANARES
107	MARMATO
108	NEIRA
109	PACORA
110	RIOSUCIO
111	SALAMINA



Fuente: IDEAM.

Por otra parte, la Autoridad Ambiental de Caldas Corpocaldas viene realizando un seguimiento a la evolución del desabastecimiento presentado en algunos acueductos y ha podido identificar los acueductos que presentan desabastecimiento (Corpocaldas, 2016). Entre ellos se encuentra el municipio de La Merced que presenta problemas de fondo en todos los componentes del sistema de abastecimiento, el municipio de Salamina presenta dificultades con las fuentes hídricas usadas producto de la disminución de oferta hídrica y el municipio de Supía presenta conflictos por uso del patrimonio hídrico y usos del suelo, en donde sobre el territorio se desarrollan actividades agropecuarias intensas, se han presentado incendios forestales y que sumado a los fenómenos macroclimáticos actuales, configuran disminución en la oferta hídrica para el municipio. Cabe destacar que, según los reportes presentados por las empresas de servicios públicos, en los municipios de Norcasia, Pensilvania, Salamina, Filadelfia, La Merced, Supía, Villamaría y Viterbo las subcuencas cuentan con necesidades hídricas, razón por la cual sobre algunos ellos se centrará el presente estudio.

El cambio climático y la variabilidad climática son dos condiciones atmosféricas que tienen papel preponderante a la hora de analizar el desabastecimiento hídrico y se convierten en los insumos fundamentales en donde, a partir del análisis de series históricas, es posible identificar periodos de estiaje. No obstante, El IDEAM generó la

Tercera comunicación Nacional de Cambio Climático – Nuevos escenarios de cambio climático para Colombia 2011 – 2100 que será referente inicial para este análisis.

Según Hashimoto, (1982) existen tres criterios para evaluar el rendimiento de un sistema de abastecimiento. Tales criterios son confiabilidad, resiliencia y vulnerabilidad. Estos criterios toman gran importancia bajo escenarios de sequía, demanda pico y condiciones climáticas extremas. La metodología usada es la teoría multiobjetivo – multialternativas concebida como un análisis más robusto que el dado por la teoría de la utilidad multiatributo. Simonovic (1999) plantea una solución para el tomador de decisiones más racional que establece metas claras y utiliza los procesos lógicos de mejor manera frente a la gestión de recursos hídricos. Vorosmarty (2000) nuevamente retoma el tema de vulnerabilidad, puesto que está íntimamente ligado a la amenaza (en función de los elementos expuestos, definidos en el caso particular como acueductos municipales, pero que no son objeto de estudio en la etapa inicial referente a la evaluación de la amenaza e incluye no sólo el factor “Climate Change” sino “Population Growth” bajo una estrecha relación. Lo importante del análisis preliminar es que (i) gran porción de la población mundial experimenta presión hídrica y (ii) el constante crecimiento poblacional generará al 2025 mayor efecto invernadero con impactos directos sobre la población.

Para la simulación de caudales extremos (en este caso de mínimos), se emplea el modelo hidrológico agregado denominado Simulación Hidrológica Abierta. El modelo se calibra y valida con la información disponible para la zona, destacando que los escenarios probables de desabastecimiento serán previamente revisados para las condiciones más favorables y/o desfavorables.

Finalmente es de vital importancia comprender conceptualmente la dinámica que se genera en el ciclo hídrico de los diferentes elementos y procesos, la importancia de ciertos procesos sobre otros en escenarios de sequía y generar confiabilidad mediante un proceso de calibración de cuencas acertado para dichas condiciones permitiendo trabajar diferentes hipótesis a través de escenarios que propongan la modificación de las condiciones actuales buscando un equilibrio ecosistémico.

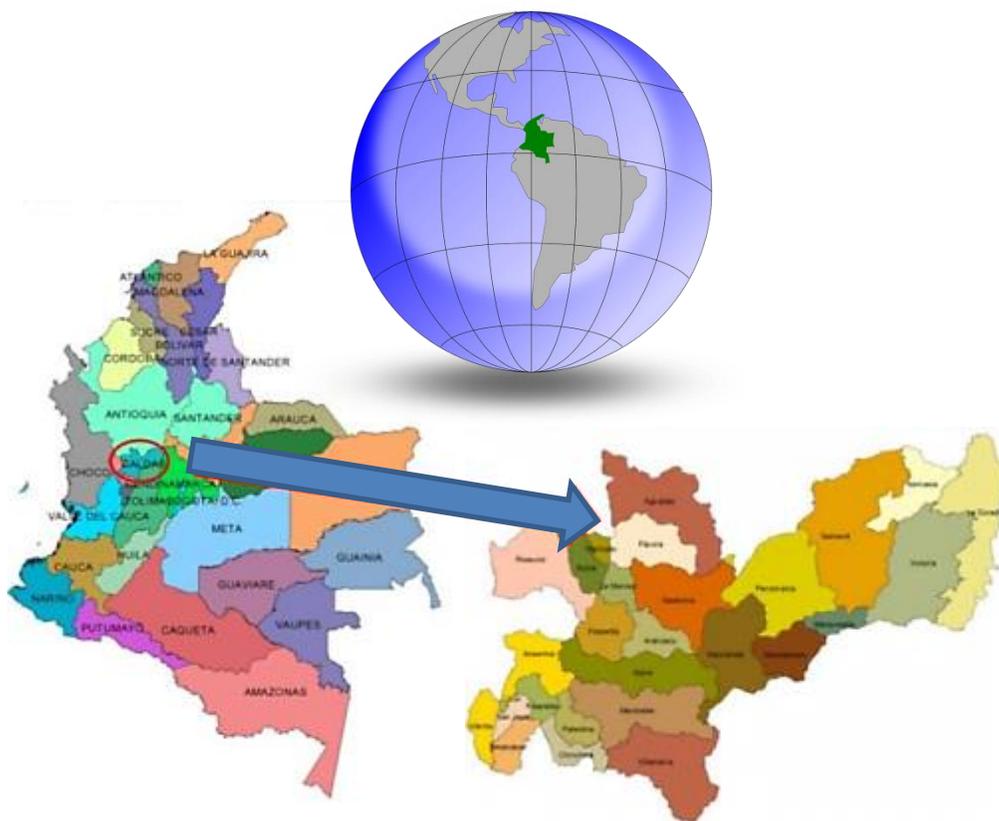
A continuación en el capítulo 2 se relacionan los objetivos y justificación, en el capítulo 3 se presentan los antecedentes y estado del arte, en el capítulo 4 se define la metodología

bajo los conceptos hidrológicos, haciendo énfasis en la modelación de eventos extremos asociados a estiaje y se expone el proceso de calibración y validación para llegar a la simulación con análisis de sensibilidad sobre algunas variables, cuyos resultados esperados son presentados en el capítulo 5; el capítulo 6 presenta las conclusiones, recomendaciones y trabajos futuros para finalmente relacionar los anexos y la bibliografía.

1.1 Área de estudio

El departamento de Caldas se localiza en la zona centro occidente de Colombia (ver Figura 5). Hace parte de la región andina y su territorio se extiende sobre la cordillera andina central. Limita con los departamentos de Antioquia (Norte), Boyacá y Cundinamarca (Oriente), Tolima y Risaralda (Sur) y Risaralda (Occidente). Cuenta con una superficie de 743.634 hectáreas y una población de 968.740 habitantes de los cuales el 69% se encuentra en zona urbana. Cuenta con 27 municipios y seis subregiones denominadas Alto Occidente, Bajo Occidente, Norte, Centro-Sur, Alto Oriente y Magdalena Caldense (CORPOCALDAS, 2012).

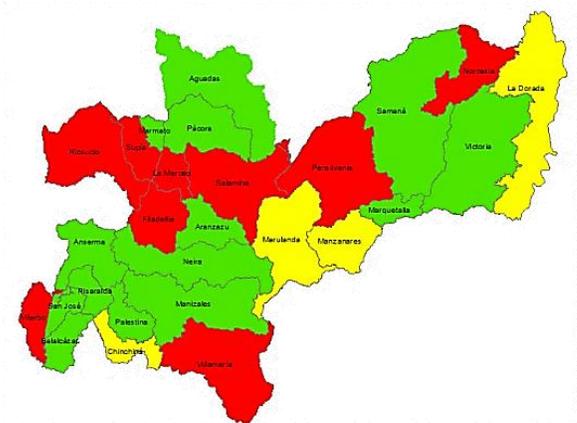
Figura 5. Área de estudio, Departamento de Caldas.



Fuente: (CORPOCALDAS, 2012)

seguimiento arroja los resultados mostrados en la Figura 7, a partir de la comparación de la demanda con la oferta hídrica.

Figura 7. Municipios con desabastecimiento hídrico durante el año 2016 y relación oferta/demanda, información suministrada por las empresas prestadoras del servicio de acueducto en Caldas.

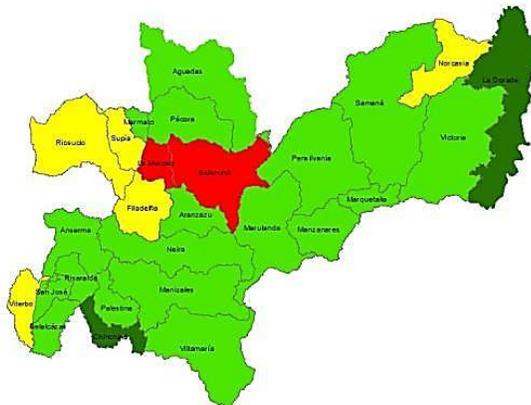


MUNICIPIO	DEMANDA	OFERTA	DIFERENCIA
AGUADAS	38	44.8	6.8
ANSERMA	55	64.1	9.1
ARAUCA	18	18.3	0.3
FILADELFIA	9.5	8.2	-1.3
CHINCHINA- CUERVOS	55	59.9	4.9
CHINCHINA- CAMPO ALEGRE*	130	120.1	-9.9
LA DORADA*	300	291.4	-8.6
MANZANARES	20	20.3	0.3
MARMATO	15	19.7	4.7
MARQUETARIA	15	16.2	1.2
MARULANDA	3	2.9	-0.1
NEIRA	22	25.7	3.7
RIOSUCIO	40	39.3	-0.7
RISARALDA	16	16.5	0.5
SALAMINA	19	15.7	-3.3
SAMANA	12	17.2	5.2
SAN JOSE	12	16.6	4.6
SUPIA	54	47.4	-6.6
VICTORIA	12	14.7	2.7
VITERBO	50	48.5	-1.5
LA MERCED	14	4.2	-9.8
MANIZALES	1100	1498.4	398.4
PACORA	28	34.0	6.0
ARANAZAJ	25	27.1	2.1
VILLAMARIA	160	143.9	-16.1
NORCASIA	15.8	13.5	-2.3
PENSILVANIA	26	23.1	-2.9

Fuente: Elaboración propia información suministrada por Corpocaldas, 2016.

Sin embargo, después de un análisis más detallado es posible definir que algunos acueductos superaron la crisis desde la operación diurna del sistema a partir del almacenamiento nocturno. Finalmente, el diagnóstico arroja los resultados que se observan en la Figura 8.

Figura 8. Municipios con racionamiento hídrico – 2016.



Fuente: Elaboración propia información suministrada por Corpocaldas, 2016.

Los municipios en color verde claro no tuvieron racionamiento. Los municipios en color amarillo tuvieron situaciones de alerta que no derivaron necesariamente en racionamiento. Los municipios en color rojo entraron en racionamiento. Los municipios en color verde oscuro entraron en racionamiento asociado al arrastre de sedimentos que taponaron las bocatomas con la aparición de lluvias.

El presente estudio no pretende los siguientes objetivos:

- No busca hacer un análisis integral riguroso sobre la prestación del servicio en los acueductos municipales que considere instancias como infraestructura y demanda.
- No considera con detalle los efectos de reducción hídrica por contaminación en las fuentes hídricas.
- No pretende estimar rigurosamente la demanda ni establecer medidas de Uso Eficiente y Ahorro de Agua.
- No busca identificar fuentes alternas sino identificar el déficit hídrico a partir de las fuentes hídricas actuales.
- No procura realizar el análisis hídrico sobre la totalidad de las áreas abastecedoras de Caldas.

El presente estudio contempla las siguientes hipótesis, limitantes y/o consideraciones:

- Uso de información secundaria para el análisis hídrico en el balance oferta – demanda.
- Sujeto a la disponibilidad de información para caracterizar las áreas abastecedoras.
- Las coordenadas dadas para los puntos de captación, es decir, bocatomas han sido validadas previamente.
- El reporte de las empresas prestadoras del servicio de acueducto, así como la información relacionada con los acueductos más críticos en el evento 2015-2016 es confiable.

Los actores comprenden son las empresas de servicios públicos de acueducto que operan en el departamento de Caldas, entes territoriales y autoridad ambiental.

2 Objetivos y justificación

2.1 Objetivos

2.1.1 Objetivo general

Estimar la amenaza en acueductos municipales con déficit hídrico en el departamento de Caldas bajo el contexto de cambio y variabilidad climática.

2.1.2 Objetivos específicos

- Estimar el déficit hídrico en las microcuencas abastecedoras de acueductos municipales en condiciones de variabilidad climática.
- Establecer los posibles efectos futuros por cambio climático en la oferta hídrica.
- Realizar el análisis de sensibilidad de los principales parámetros para la gestión integral del recurso hídrico considerando la amenaza por desabastecimiento.

2.2 Justificación

2.2.1 Interés

El interés del presente trabajo consiste en conocer con mayor profundidad las condiciones de déficit hídrico para la planificación del por parte de los acueductos municipales con problemas de abastecimiento en Caldas.

2.2.2 Novedad

La novedad radica en que, producto de la deficiente medición de caudales en las fuentes hídricas por parte de las empresas de acueducto, es necesario recurrir a la modelación hidrológica como herramienta que permite intuir el comportamiento hídrico de las áreas abastecedoras de los acueductos objeto de análisis.

2.2.3 Utilidad

La planificación en la prestación del servicio generará menores impactos negativos sobre la población, la cual se ha visto sorprendida con racionamientos producto del déficit presentado en meses anteriores. La utilidad del presente trabajo permitirá generar herramientas de adaptación a partir de los insumos generados.

3 Antecedentes

3.1 Generalidades

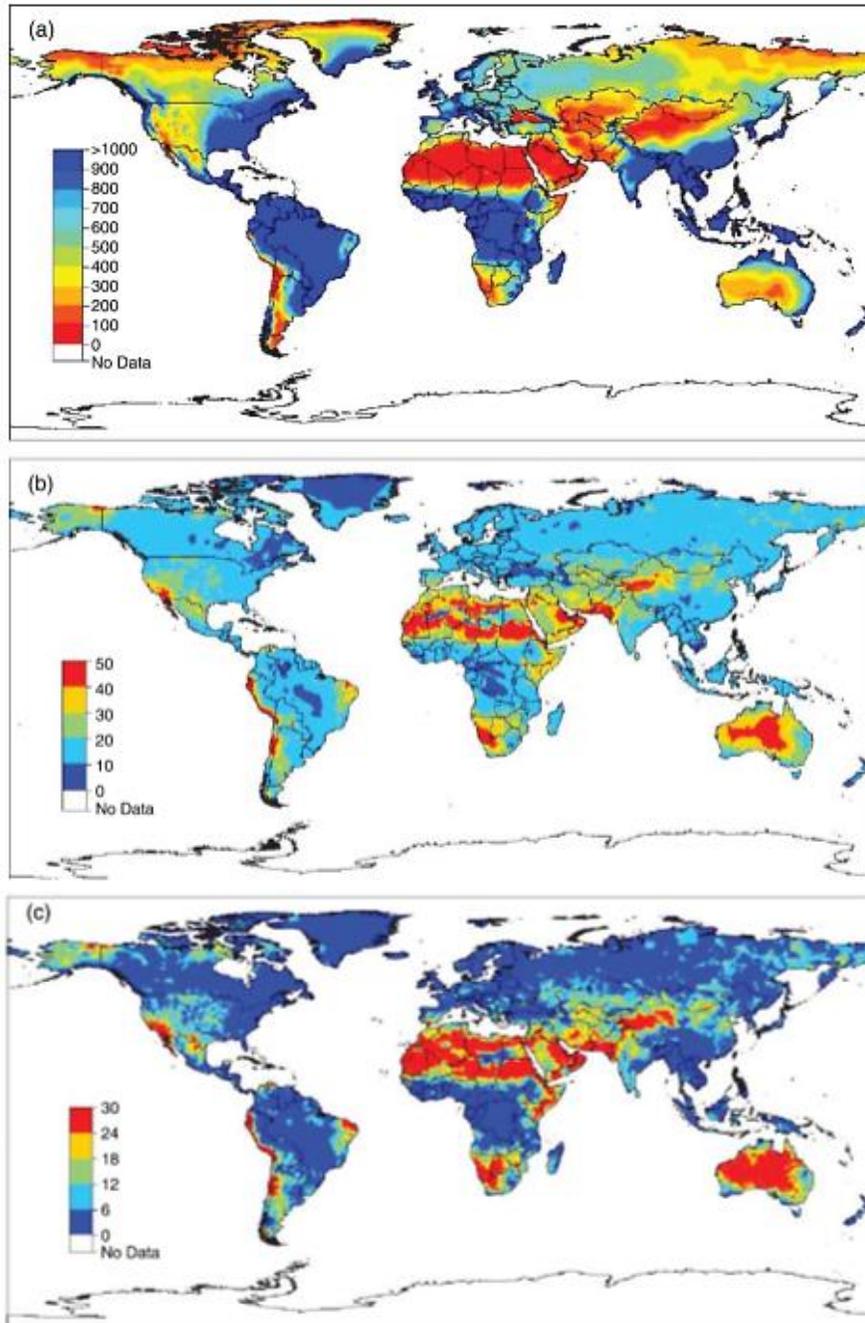
El agua es un elemento fundamental en el desarrollo de las civilizaciones. Desde tiempo atrás la necesidad de solucionar lo relacionado con el abastecimiento y saneamiento básico ha sido de interés en todo el planeta. La concepción del abastecimiento se puede clasificar a grandes rasgos en tres aspectos: Oferta, Infraestructura y Demanda hídrica. Históricamente se han presentado diferentes avances en búsqueda del beneficio del indispensable y vital recurso dentro de los que destacan la construcción de presas en el año 2.770 A.C. y la construcción de los rimeros acueductos cerca al siglo VII A.C. (IAGUA - Locken, 2016).

El primer caso de un sistema de abastecimiento se presentó en la ciudad de Mohenjo – Daro en el Valle del Indo, actual Pakistán. De igual forma en la antigua Grecia se reportaron complejos sistemas de abastecimiento (IAGUA - Locken, 2016).

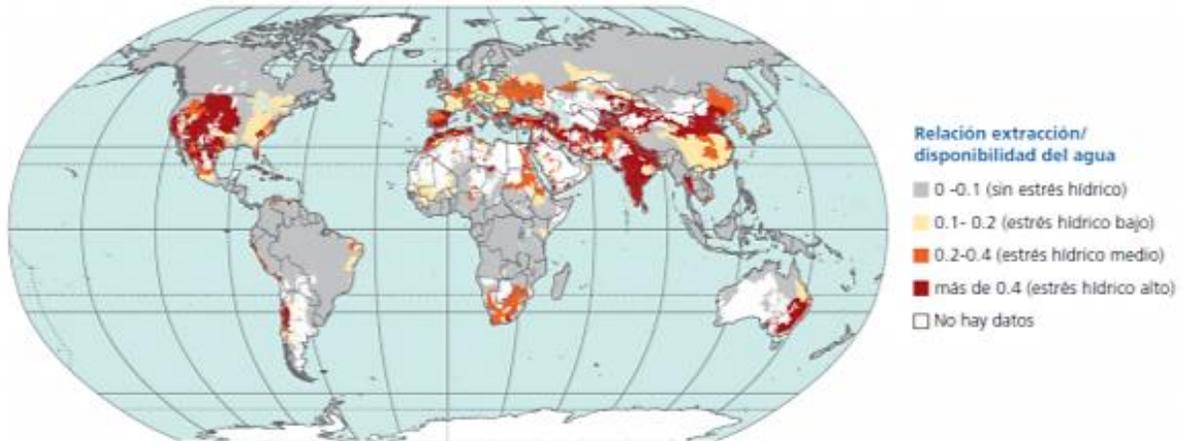
En todos estos casos se registran grandes avances relacionados con la infraestructura y últimamente con la demanda. Sin embargo en pocas ocasiones se estudia rigurosamente lo relacionado con la oferta hídrica, es decir, caudales disponibles, régimen climático y de las fuentes hídricas, circunstancias en periodos húmedos y secos entre otros.

En la actualidad las estimaciones a través de los balances hídricos anuales durante épocas medias o húmedas, e incluso secas a nivel mundial, así como los balances de oferta y demanda, sugieren excedentes hídricos para Colombia tal como lo muestran la Figura 9 y la Figura 10:

Figura 9. Mapas globales de (a) precipitación media anual (mm); (B) el coeficiente de variación de la precipitación anual (%) y (c) la probabilidad (%) de la precipitación anual en cualquier año que sea inferior al 75% del valor anual medio a largo plazo.



Los mapas se construyen sobre la base de series de tiempo simuladas de precipitación mensual de 1960-2000 a una resolución espacial de 0.5 x 0.5 grados (fuente de datos: Unidad de Investigación Climática, Escuela de Ciencias Ambientales, Universidad de East Anglia, Norwich, Reino Unido). Tomado de: (Smakhtin & Shipper, 2008).

Figura 10. Relación extracción vs disponibilidad hídrica mundial.

Fuente: (UNESCO, 2016)

Sin embargo, esta abundancia hídrica configura un mito y difieren de la realidad que vive el territorio nacional y departamental (Caldas) durante las épocas de sequía, en las cuales se presenta sobre algunos casos, desabastecimiento en los acueductos municipales y en general, déficit de agua para las diferentes actividades humanas (UNESCO, 2016).

De otro lado las preocupaciones sobre las tendencias de las pérdidas asociadas con los desastres naturales en los países desarrollados se magnifican cuando se colocan en el contexto de las naciones en desarrollo. La sequía es considerada por muchos como la amenaza natural más compleja pero menos entendida, afectando más personas que cualquier otra amenaza (Wilhite D. , 2000). Existen diferentes procesos ambientales dentro de los que destaca el ciclo del agua que se presenta a continuación.

3.2 El Ciclo del Agua.

El agua es un recurso natural vital para plantas, animales y seres humanos. Como el agua regula el metabolismo de cada ser vivo, la vida sin ella es inconcebible. Aproximadamente el 70 % de la superficie del globo está cubierta de agua, y menos del 3% de ella es agua dulce. Esta agua dulce se presenta en diversas formas: 79% en forma de hielos polares y 20% en forma de agua subterránea difícilmente accesible. Sólo un 1% se encuentra fácilmente disponible en ríos, lagos y pozos (UNESCO - UNCCD, 1997).

El ciclo del agua hace referencia a las interacciones que se presentan entre el medio físico y el atmosférico a través del intercambio de energía del sistema hídrico. El proceso más importante en la mayor parte del planeta está relacionado con la precipitación y un ciclo simplificado contempla además la evapotranspiración y la infiltración, dando como resultado la presencia de escorrentía relacionada con parte del caudal presente en nuestras fuentes hídricas tal como se presenta en la Figura 11.

Figura 11. Ciclo del agua.

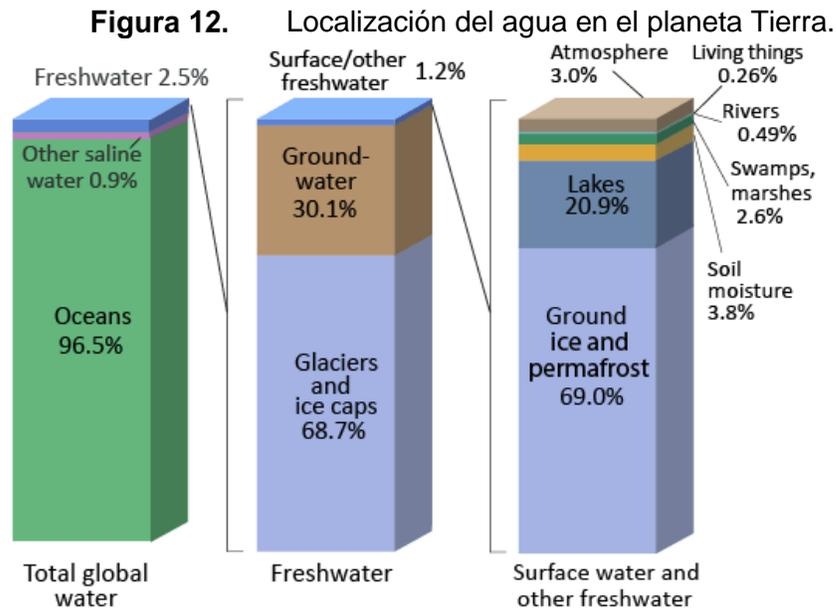


Fuente: USGS.

Tres componentes hídricas identificadas claramente en el ciclo hidrológico y de especial interés para las condiciones dinámicas de las corrientes son la escorrentía, flujo subsuperficial o interflujo y el agua subterránea. Al respecto algunos autores (Baker, 1960) sugieren específicamente conocer lo siguiente:

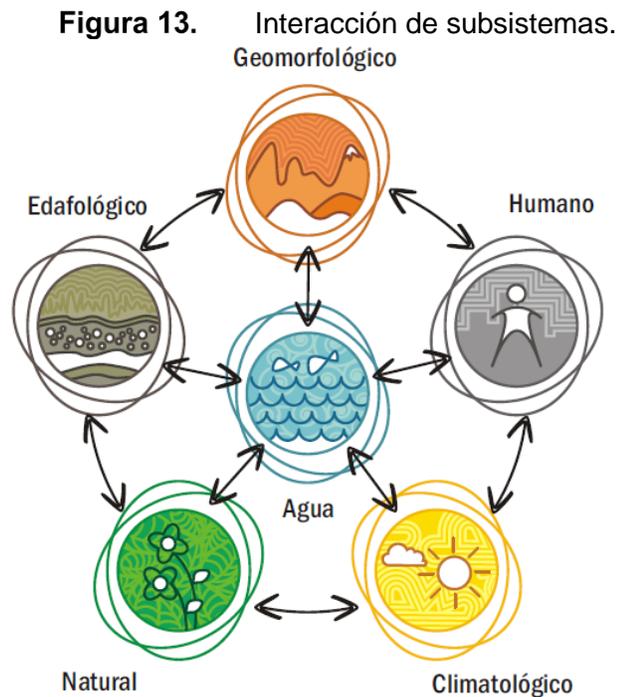
- Propiedades hidrológicas y físicas de zonas inundables sobre varias condiciones (saturadas, secas, varios grados de humedad y humedades intermitentes).
- Capacidad de infiltración de las zonas inundables bajo diferentes condiciones.
- Operación de zonas inundables/depósitos con descarga bajo ciertas condiciones.
- Operación de las zonas inundables y depósitos como un elemento de recarga.
- Operación de las zonas inundables y depósitos como un elemento de almacenamiento bajo ciertas condiciones.
- Contribución de zonas inundables en el almacenamiento y a la escorrentía.

Por otra parte la distribución del agua en el planeta es representada en la Figura 12:



Fuente: (Shiklomanov's, 1993)

Es fundamental reconocer la interacción entre diferentes subsistemas puesto que no solo existe el clima, el agua y el hombre, sino subsistemas como el geomorfológico, el edafológico y el natural (Figura 13) (CINARA - UTP, 2011).

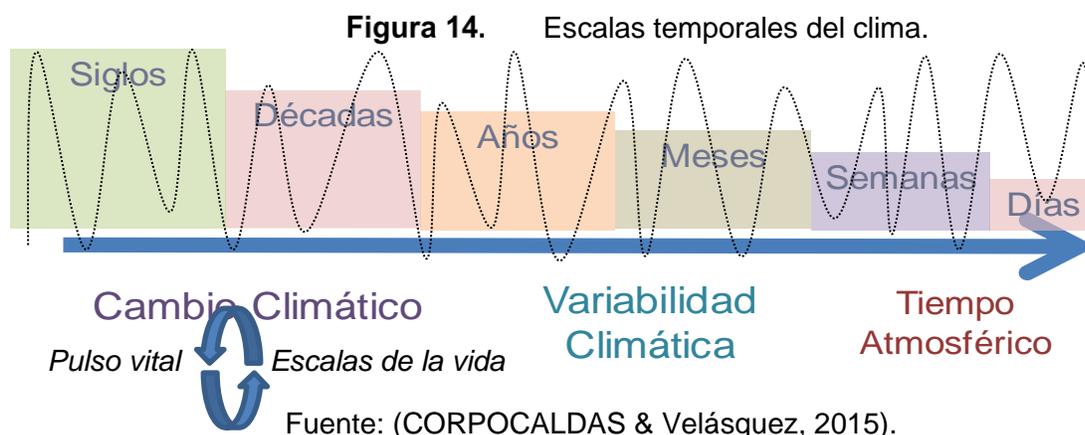


Fuente: (CINARA - UTP, 2011)

3.3 Clima.

Según la OMM, el clima puede entenderse como la “*Síntesis de las condiciones meteorológicas en un lugar determinado, caracterizada por estadísticas a largo plazo de los elementos meteorológicos en dicho lugar*” mientras que la variabilidad climática se define como la “*Desviación de las estadísticas del clima de un determinado período (mes, estación o año) respecto a las estadísticas a largo plazo de dicho período*” y el cambio climático es definido como la “*Modificación a largo plazo del clima producida por uno o más de los siguientes factores: i) cambios internos dentro del sistema climático; ii) interacción entre componentes climáticos; iii) cambios en fuerzas externas originados por fenómenos naturales o por actividades humanas*” (OMM, 2012).

En otras palabras, la escala temporal para el tiempo atmosférico se presenta en horas-día, el clima en semanas, la variabilidad climática en años, el cambio climático en décadas, el holocénico climático en miles años y las eras geológicas en millones de años (Australian Government Bureau of Meteorology, 2017) ver Figura 14.



Existe una estrecha relación entre las oscilaciones que componen el clima y los ecosistemas, puesto que el uso reacciona frente al otro. A lo anterior se le ha denominado pulsos compartidos (CORPOCALDAS & Velásquez, 2015). El clima andino está definido no solo por las condiciones orográficas, sino por fenómenos presentes en la Zona de Confluencia Intertropical, corrientes de viento que ingresan por el atlántico y el pacífico, frentes húmedos amazónicos y la corriente denominada Chorro del Chocó (Jaramillo, 2005), entre otros.

La localización de las líneas del ecuador, junto con el movimiento traslacional y rotacional del planeta influye directamente en las dinámicas atmosféricas y tal comportamiento recibe el nombre de Circulación general de la atmósfera (IDEAM, 2005) (Australian Government Bureau of Meteorology, 2017).

3.3.1 Variabilidad climática.

Son múltiples los fenómenos de variabilidad climática que se presentan en todo el mundo y difieren del Cambio Climático y demás oscilaciones del clima en las escalas temporales. La variabilidad climática incluye a su vez diferentes escalas temporales que se describen a continuación de acuerdo a meteorólogos del IDEAM (IDEAM, 2009):

Estacional: Fluctuación del clima a escala mensual y anual. En latitudes medias, las secuencia de las estaciones de invierno, primavera, verano y otoño es algo común para los habitantes de dichas regiones, en tanto que en latitudes tropicales, lo frecuente es la alternancia de temporadas lluviosas y temporadas secas.

Intraestacional: Existen evidencias que dentro de las estaciones se presentan perturbaciones que determinan las condiciones de tiempo durante decenas de días. Con oscilaciones desapercibidas por su pequeña amplitud, en comparación con el ciclo anual. Dentro de las oscilaciones intraestacionales se destaca una señal de tipo ondulatorio, denominada de 30-60 días. Detectada en la actividad convectiva en el Pacífico Tropical Oriental y en la precipitación de la América Tropical. Esta oscilación se asocia con las ondas de Madden-Julian, descubiertas en 1971 en el campo de la presión tropical.

Interanual: Corresponde a variaciones en términos climatológicos de año en año. Normalmente percibimos que la precipitación de la estación lluviosa en un determinado lugar fluctúa por encima o por debajo de lo normal. Ejemplos típicos de la variabilidad climática interanual corresponden a los fenómenos enmarcados dentro del ciclo El Niño – La Niña – Oscilación del Sur, ENSO y la Oscilación Cuasibienal, con un período irregular que varía entre 20 y 35 meses; en cada lapso se alternan los vientos.

Interdecadal: En esta escala se manifiestan fluctuaciones del clima a nivel de décadas. Comparativamente con la variabilidad interanual, la amplitud de estas oscilaciones es menor, razón por la cual este tipo de variabilidad pasa desapercibida

Los fenómenos de variabilidad suelen estar relacionados con eventos extremos y se interrelacionan entre sí en la medida que su presencia cíclica coincida en sus fases más extremas (máximos y mínimos). En consecuencia es fundamental el monitoreo de la temperatura superficial del mar (TSM) para el caso de los ENSO (Niño – Niña) de los cuales se describe a continuación la fase seca, es decir, “El Niño”.

▪ **El Niño Oscilación del Sur – ENSO**

Es la más relevante oscilación de variabilidad climática interanual (IDEAM, 2009), tiene una estrecha relación con periodos de sequía. Ocurre por el calentamiento de las aguas del Pacífico y cuenta con dos fases extremas denominadas “El Niño” y “La Niña”. Sus efectos difieren notablemente a lo largo del continente y sus efectos son globales como lo esboza y mientras en algunas zonas al norte del Ecuador se registra humedad, desde el Pacífico Tropical central hasta las costas del norte de Perú, Ecuador y sur de Colombia. se registra cálido y seco (NOAA, 2015).

Conocido como “El Niño” por la coincidencia temporal con la decembrina navidad y “La Niña” por su antónimo en cuanto a los efectos (condiciones húmedas). La Niña se refiere a las condiciones frías extremas que recurrentemente, pero de manera irregular, se presentan en el sector central y oriental del Pacífico Tropical durante por lo menos seis meses (IDEAM, 2009). Ésta alteración debilita los vientos alisios, reduciendo el flujo ascendente y alterando las corrientes oceánicas (IPCC, OMM, PNUMA, 2013). La localización de dicha anomalía se da en las aguas del Pacífico y se define por la región del Pacífico alterada (4 al occidente, 3-4 al centro y 1-2 al oriente) (NOAA, 2015).

Existen variados índices para clasificar el ENSO y el más utilizado en el país como referente es el ONI (Índice Oceánico de El Niño) que describe la anomalía en la Temperatura Superficial del Mar. El índice es calculado como la media móvil de tres puntos de la serie mensual de anomalías de la temperatura de la superficie del mar en la Región Niño 3-4. De acuerdo con este índice, en condiciones El Niño, el ONI debe ser mayor ó igual a $+0.5$ °C y para La Niña debe ser menor ó igual que -0.5 °C. Ahora, para clasificar un período determinado como El Niño ó La Niña, estos umbrales deben ser excedidos por un período de al menos cinco meses consecutivos (IDEAM, 2009) (NOAA, 2015). Sus fases corresponden a inicio, desarrollo, madurez y debilitamiento (IDEAM,

1997). Los años en los cuales se presentó el ENSO en sus dos fases (húmedo y seco) son El Niño fuerte: 1957-58, 1965-66, 1972-73; El Niño muy fuerte: 1982-83, 1997-98, 2015-16; La Niña moderado 1955-56, 1970-71, 1998-99, 1999-00, 2007-08, 2010-11; La Niña Fuerte: 1973-74, 1975-76, 1988-89 (*Null (CCM), 2017*). De los episodios cálidos destaca entre el indicador SOI y la TSM en eventos de 1982, 1997 y 2016, así la precedencia de eventos La Niña de importancia una vez transcurre el evento El Niño de intensidad fuerte (Datos del Australian Bureau of Meteorology, 2016) (Frey, 2016).

La clasificación de los eventos ENSO históricos reflejan que el evento fuerte de 1997-98 tuvo una duración de 13 meses y mayor índice SOI del evento de 2.74 y un índice máximo para diciembre del 97 de 3.9. La mayor duración registrada es de 16 meses para el evento fuerte de 1982-83. El evento de 1991-1992 fue moderado, con una duración de 8 meses y un SOI de 1.44 y tal vez sea recordado por los impactos causados en Colombia asociados a imprevisión energética (IDEAM, 1997) (IDEAM, 2007). Si bien el evento de 2015-16 no contó con anomalías drásticas, la característica que destacó allí fue la duración y la evolución similar al evento de 1997-98 (UNGRD, 2016).

Vale la pena resaltar que la Autoridad Ambiental del departamento de Caldas (Corpocaldas) adelanta la formulación de los POMCAs y como insumo fundamental se elabora el análisis de variables hidroclimatológicas y es así como es posible acceder a información procesada referente a los impactos de El Niño referente a oferta hídrica y su alteración. Para la cuenca del río Chinchiná se evidenciaron los efectos del ENSO en los caudales mensuales interanuales (CORPOCALDAS, 2012). El desabastecimiento se presente como amenaza de tercer orden después del déficit hídrico y variaciones del ciclo hidrológico (MINAMBIENTE, 2005) y por tal razón el ENSO es el componente más importante de la variabilidad climática interanual para extremos.

▪ **Zona de Confluencia Intertropical, ZCIT**

Zona de máxima nubosidad y lluvia ocasionada por la convergencia de vientos alisios del Noreste y Sureste. Se desplaza siguiendo el movimiento aparente del sol sobre la tierra con un rezago de aproximadamente dos meses. En Colombia determina la presencia de lluvias por la interacción atmosférica entre la Orinoquía y el Pacífico. La ZCIT alcanza su posición extrema meridional a finales y comienzos de año. Para abril y mayo se registra su paso sobre la parte media del país, alcanzando su posición más septentrional en los

meses de agosto y septiembre. En octubre y noviembre se registra nuevamente su paso por el centro del país retornando al sur. Sobre la parte continental del país la ZCIT se manifiesta como una serie de conglomerados convectivos no muy bien organizados (IDEAM, 2009). De allí se deriva el comportamiento bimodal de la zona. Es el mayor agente de variabilidad interanual bajo condiciones normales sobre la región andina.

▪ Otras oscilaciones climáticas

Otras oscilaciones climáticas suelen estar gobernados por la dinámica atmosférica relacionada con dirección y velocidad de vientos, modificando todo un complejo sistema atmosférico en términos del clima (precipitación y temperatura). Algunos de ellos son la Circulación de MADDEN-JULIAN (MJO), Oscilación del Atlántico Norte (NAO), Oscilación Cuasibienal (QBO), la radiación de onda larga saliente (ORL), la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO), la temporada de vientos de la alta y baja tropósfera en el pacífico tropical, entre otros, sin embargo se logró establecer que la señal inducida por El Niño, La Niña – Oscilación del Sur es la más destacada dentro de la variabilidad interanual de los océanos expuestos por medio de la Figura 15 (IDEAM, 2009).



Fuente: (Jaramillo Robledo, 2016)

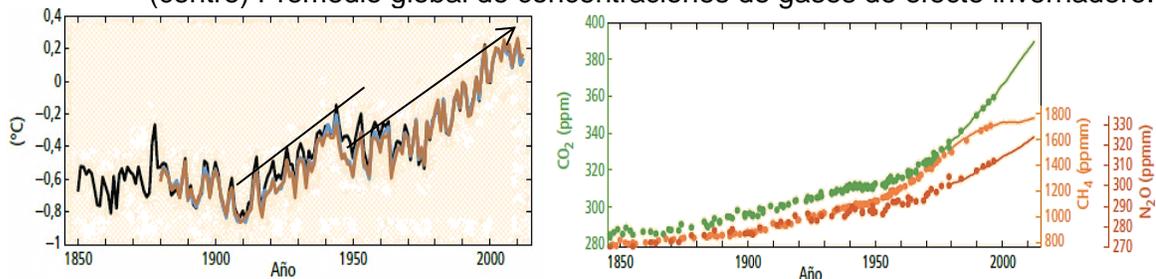
La MJO se produce por la circulación propagada al oriente con vientos zonales de signo opuesto en la baja y alta tropósfera durante 40 o 50 días a través de diferentes celdas (Madden & Julian, 1972). Representa entonces una actividad convectiva en el Pacífico Tropical Oriental y altera la precipitación con un comportamiento de ondas.

3.3.2 Cambio climático

Desde la década de 1950 muchos de los cambios del clima observados no han tenido precedentes en los últimos decenios y/o milenios. La atmósfera y el océano se han calentado, los volúmenes de nieve y hielo han disminuido, el nivel del mar se ha elevado y las concentraciones de gases de efecto invernadero han aumentado (IPCC, 2013). La convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) fue adoptada en Nueva York el 9 de mayo de 1992 y su objetivo es “la estabilización de las concentraciones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) en la atmósfera a un nivel que impida interferencias antropogénicas peligrosas en el sistema climático” (IPCC, 2014). El aumento de las concentraciones de CO_2 , que se han incrementado notoriamente posterior a la revolución industrial, ha contribuido al denominado forzamiento radiactivo total relacionado con los gases de efecto invernadero (IPCC, 2013).

Las moléculas de los GEI tienen la capacidad de absorber y remitir las radiaciones de onda larga (infrarroja, eminentemente térmica) que provienen del sol y la que refleja la superficie de la Tierra hacia el espacio, controlando el flujo de energía natural a través del sistema climático, buscando mantener el balance energético de la misma. Este ajuste generará un cambio climático con alteraciones meteorológicas en eventos extremos y se presentará una variedad de impactos (IDEAM, 2005). Las gráficas que presenta el IPCC en sus reportes (Figura 16) evidencian claramente una tendencia de la temperatura global en términos de anomalía al incremento y del promedio global del cambio del nivel del mar, lo anterior relacionado con el también incremento del promedio global de concentraciones de GEI.

Figura 16. (izq) Anomalía del promedio global de temperaturas en superficie, terrestres y oceánicas. (der) Promedio global del cambio del nivel del mar. (centro) Promedio global de concentraciones de gases de efecto invernadero.



Fuente: (IPCC, 2014)

En Colombia algunas evidencias se aprecian con el retroceso glaciar, el cual es objeto de permanente seguimiento y su evolución a partir de análisis comparativos (Figura 17). Las trayectorias de concentración representativas (RCP) son proyecciones realizadas en función de diferentes escenarios probables en el futuro con un escenario de mitigación estricto (RCP2,6), dos escenarios intermedios (RCP4,5 y RCP6,0) y un escenario con un nivel muy alto de emisiones de GEI (RCP8,5) (IPCC, 2014) ver Figura 18:

Figura 17. Evidencias de cambio climático en Glaciares Andinos.

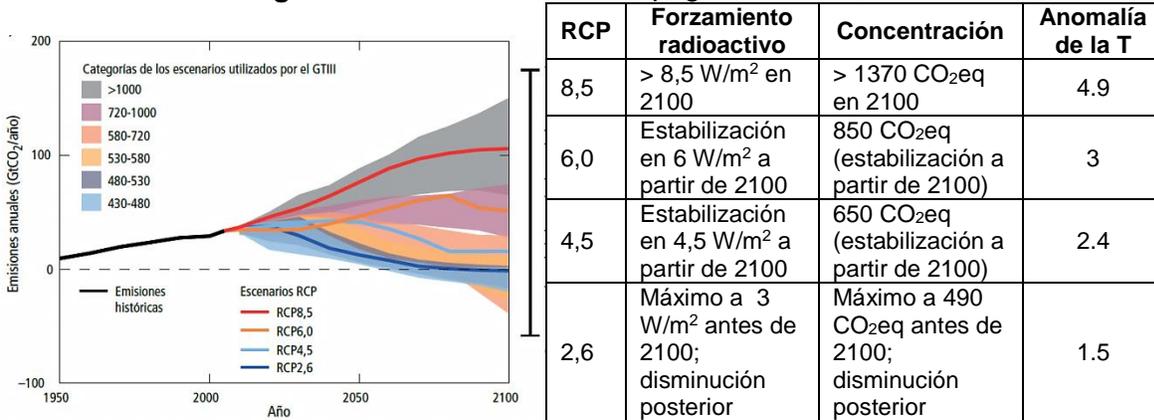


Glaciar sur, Nevado Santa Isabel.
IDEAM – Jorge Luis Ceballos, 2006-2010.

Volcán Nevado Santa Isabel y del Ruiz.
IDEAM: Hermann –hoeck, 1931 y PNN, 2011

Fuente: IDEAM, 2012.

Figura 18. Emisiones antropógenas de CO₂ anuales.

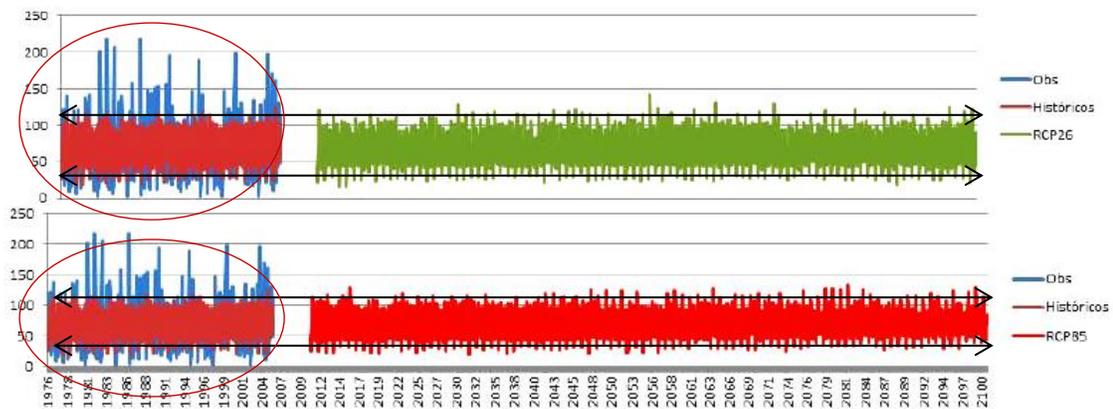


Fuente: (IPCC, 2014) adaptado por (IDEAM, PNUD, MADS, DNP, CANCELLERIA, 2015).

El incremento en variables como la temperatura acelera el ciclo hidrológico, con consecuencias tales como mayor evapotranspiración y por tanto precipitaciones más intensas (OMM, 2013). Diferentes investigaciones han sugerido la temática de calentamiento global por la tendencia en variables como la temperatura, la cual muestra un incremento de entre 0.65°C y 1.06°C en el periodo entre 1880 y 2012, con proyecciones hasta el 2100. Cada una de las últimas tres décadas ha sido más cálida que las anteriores desde 1850, siendo la primera década del siglo XXI la más cálida de todas y finalmente la precipitación ha presentado cambios notables entre 1901 y 2010 así

como en 1951 y 2010 en lo relacionado con frecuencia e intensidad. Diferentes investigaciones indican que los cambios no serán uniformes y se realzaría el contraste en regiones húmedas y secas (IDEAM, PNUD, MADS, DNP, CANCELLERIA, 2015). Como el sistema climático en medio de su dinámica, busca cierto equilibrio, la posibilidad que los eventos extremos se presenten con mayores intensidades es aún mayor y tanto los eventos torrenciales como las sequías serán de especial interés para la humanidad en lo relacionado con su subsistencia (IDEAM & Hurtado, 2012). El IDEAM ha generado la Tercera Comunicación de Cambio Climático a partir de los modelos de circulación global MCG tales como el bcc-csm1.1, bcc-csm 1-1m, CCSM4, CESM1CAM5, CSIRO-MK3.6.0, FIO-ESM, GFDL-CM3, GISS-E2H, GISS-E2R, HadGEM2-AO, HadGEM2-ES, IPSL-CM5A-LR, IPSL-CM5A-MR, MIROC-ESM, MIROC5, MRI-CGCM3, NorESM1-M y NorESM1-ME. Los modelos han sido ensamblados para diferentes estaciones a lo largo del territorio Colombiano. Las desventajas de los escenarios planteados para el presente ejercicio radican en la amplia escala espacial que supone uniformidad en condiciones del clima local y en la poca representación de la variabilidad en extremos tal como se puede observar en la Figura 19.

Figura 19. Poca representación de la variabilidad para eventos extremos.



Fuente: (IDEAM, PNUD, MADS, DNP, CANCELLERIA, 2015)

De acuerdo con lo anterior, la importancia de considerar el cambio climático en el presente estudio radica en el efecto que trae el cambio de la precipitación así como en la temperatura, que necesariamente alteran el régimen de las corrientes hídricas y por tanto la disponibilidad para el abastecimiento y demás actividades humanas. Es decir que el cambio climático acentúa los impactos climáticos de los eventos extremos, pudiendo generar escenarios críticos por alteración de ciclo hidrológico.

3.4 Sequía

3.4.1 Conceptos

Existen dos tipos de definiciones. Una conceptual y otra operativa. Las definiciones conceptuales son definiciones genéricas encontradas normalmente en los diccionarios (Wilhite D. , 1993). Las definiciones operativas buscan identificar características específicas y umbrales para definir el inicio, continuación y final de episodios de sequía así como su severidad y fundamentadas en un efectivo sistema de alertas tempranas (Wilhite D. , 2000). Existen múltiples definiciones entre las que destacan:

Tiempo seco de larga duración (RAE); Condición cuando la cantidad de agua que se ha esperado y se ha confiado para el uso en cualquiera de las actividades del hombre no puede ser satisfecha por alguna razón (Takeuchi, 1974); Intervalo de tiempo, generalmente del orden de meses o años de duración, durante el cual el suministro real de humedad en un lugar dado es más o menos consistente con el suministro de humedad climáticamente esperado (Palmer, 1965); Período de tiempo anormalmente seco suficientemente prolongado para que la falta de precipitación cause un grave desequilibrio hidrológico y lleve connotaciones de una deficiencia de humedad con respecto al uso del agua por el hombre (McMahon & Arenas, 1982);

Ocurrencia sostenida y regionalmente extensa de aguas naturales por debajo del promedio, ya sea en forma de esorrentía o de aguas subterráneas (UNESCO - WMO, 1985); Disminución de la disponibilidad de agua en un período determinado y en un área particular (Beran & Rodier, 1985); Grave escasez en la aparición de aguas naturales con respecto a la normalidad (Ben-Zvi, 1987); Consecuencia de una reducción natural de la cantidad de precipitación recibida durante un período prolongado de tiempo (Wilhite D. , 2000); Deficiencia de precipitación superior a lo esperado o normal que, cuando se extiende durante una temporada o un período de tiempo más largo, es insuficiente para satisfacer las demandas de las actividades humanas, dando como resultado impactos económicos, sociales y ambientales por Tannehill; Período prolongado –temporada, año o varios años- de lluvias deficientes en relación con la media estadística plurianual para una región por Schneider en 1996 para The Encyclopedia of Climate and Weather; Fenómeno natural que se produce cuando las lluvias han sido significativamente

menores a los niveles normales registrados. Ausencia prolongada o escasez acusada de precipitaciones. (UNESCO - UNCCD, 1997); Desequilibrio natural, pero temporal, de la disponibilidad de agua, consistente en una precipitación persistente inferior a la media, de frecuencia, duración y gravedad inciertas, impredecible o difícil de predecir, lo que resulta en una menor disponibilidad de recursos hídricos y una menor capacidad de carga del Ecosistemas (UNESCO, 2002); Deficiencia de precipitación que redundan en una escasez de agua (WMO, 2005); Diferencia acumulada entre evapotranspiración potencial y precipitación durante un período determinado en el cual la precipitación es la menor de las dos variables (OMM, 2012); Período de condiciones anormalmente secas durante suficiente tiempo para causar un desequilibrio hidrológico grave (IPCC, OMM, PNUMA, 2013); Período de condiciones más secas de lo normal que resulta en problemas relacionados con el agua (USGS, 2016).

Sin embargo, la ausencia de una definición precisa y universalmente aceptada aumenta la confusión acerca de la presencia del evento y su severidad (Wilhite D. , 2000). Por lo anterior, el autor del presente documento propone la siguiente definición:

“Déficit hídrico sobre atmósfera, suelo y cuerpos de agua respecto a condiciones normales de una región, con características de intensidad, duración, frecuencia y extensión”.

3.4.2 Tipos de Sequía

Se han definido cuatro tipologías de sequía (Dracup, Lee, & Paulson, 1980):

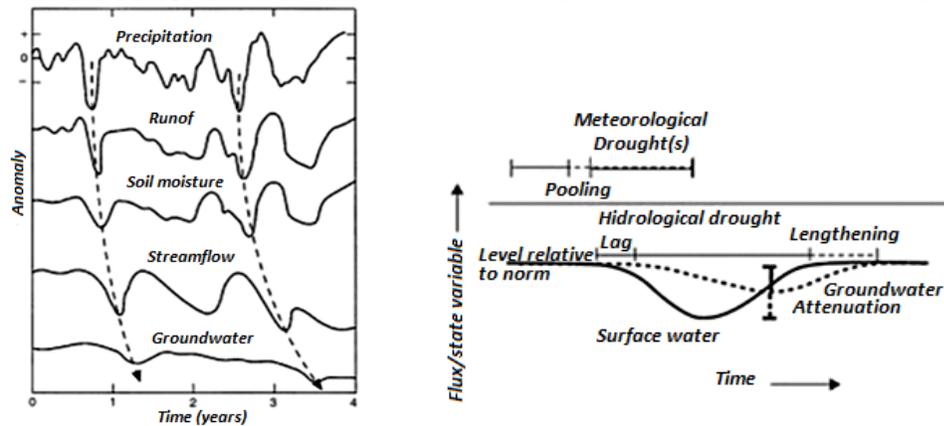
- **Sequía meteorológica:** Resultado de la ocurrencia y persistencia de perturbaciones a gran escala en el patrón de circulación global de la atmósfera (Wilhite D. , 2000). Precipitación fuera de lo normal en determinado periodo de tiempo (Department of Geophysics, University of Oslo, 2000).
- **Sequía agrícola:** Susceptibilidad de los cultivos en las diferentes etapas del desarrollo de la planta a partir de la sequía meteorológica. Adquiere inicialmente las características de la sequía meteorológica, enfocado por escasez de precipitación, diferencias entre la evapotranspiración actual y potencial, déficit de agua en el suelo y así sucesivamente. La demanda de agua de una planta vegetal depende de las

condiciones climáticas (Wilhite D. , 2000). Generalmente se expresa en términos de la humedad necesaria del suelo de un cultivo en un momento determinado (Department of Geophysics, University of Oslo, 2000).

- **Sequía hidrológica:** Está asociada con los efectos de periodos de la escasez de precipitación sobre los flujos superficiales y subsuperficiales en el abastecimiento de agua y están por fuera de las fases de ocurrencia de las sequías meteorológicas o agrícolas. (Wilhite D. , 2000). Expresiones de deficiencias en el suministro de agua superficial y subsuperficial. Refleja los efectos y los impactos de las sequías (Department of Geophysics, University of Oslo, 2000).
- **Sequía socioeconómica:** Está relacionada con el abastecimiento y demanda de algún bien o servicio económico con elementos de la sequía meteorológica, agrícola e hidrológica. Otra definición propuesta por Sandford en 1979 propone como definición de sequía cuando la demanda de ese bien excede la oferta y dando como resultado un déficit en el abastecimiento por condiciones climáticas. Lo anterior demuestra la fuerte simbiosis que existe entre la sequía y las actividades humanas. (Wilhite D. , 2000). Definiciones que asocian las sequías con la oferta y la demanda de un bien económico (Department of Geophysics, University of Oslo, 2000).

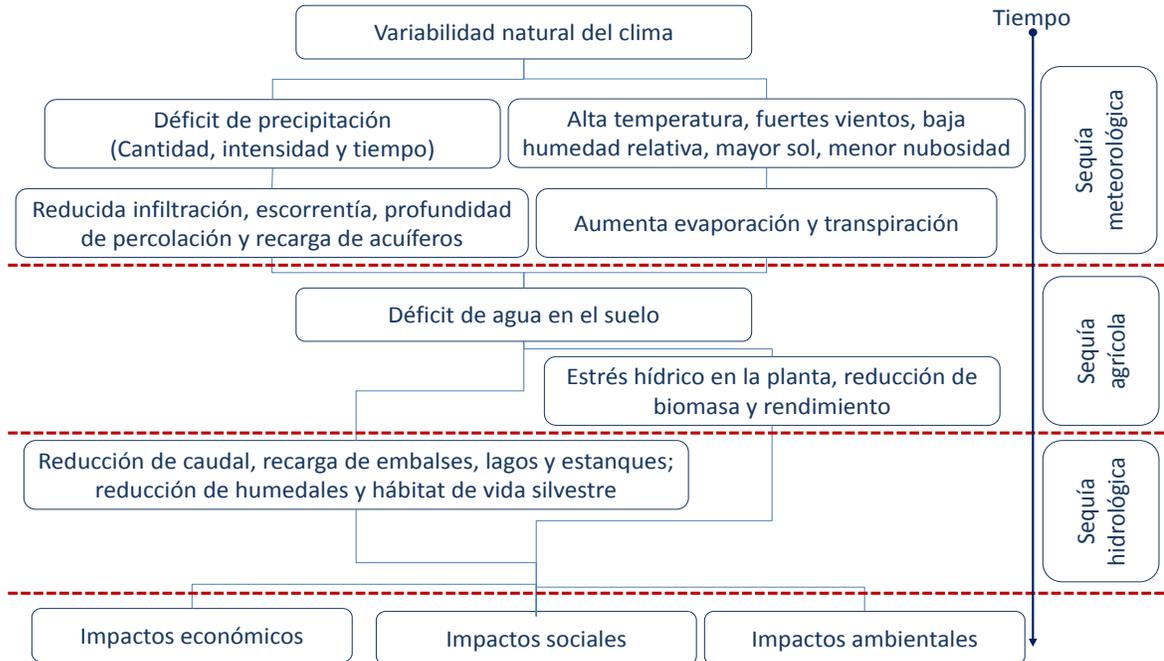
Tal como se manifiesta en la Figura 20, se presenta una propagación de la anomalía en la precipitación a través de la parte terrestre sobre diferentes variables del ciclo hidrológico. Van Loon establece las relaciones entre la sequía meteorológica e hidrológica, reconociendo el rezago presentado entre tipos de sequía. Existe una interesante y consecuente relación entre las diferentes sequías (Figura 21). La sequía meteorológica resulta de la deficiencia de precipitación, la sequía agrícola es más extensa y resulta de deficiencias en la humedad del suelo. La sequía hidrológica se suele presentar a escala de cuenca hidrográfica; los efectos de este tipo de sequía pueden continuar por muchos meses y años más (Wilhite D. , 2000). Tal rezago obedece a que, a pesar de finalizada la sequía meteorológica, la humedad del suelo debe ser restablecida y las corrientes deben recuperar sus caudales en condiciones normales, lo cual toma tiempo.

Figura 20. Propagación de la precipitación a través de distintos componentes y propagación de la sequía meteorológica sobre la sequía hidrológica.



Fuente: (Van Loon, 2015)

Figura 21. Relación entre varios tipos de sequía y la duración de los eventos.



Fuente: (Wilhite D. , 2000)

La sequía es una característica normal del clima y ocurre en todos los regímenes climáticos (Wilhite D. , 2000) y derivan en impactos de gran alcance sobre una importante área del territorio (Wilhite D. , 1990). En cuanto a escalas temporales, se recomienda estudiar índices de 1 ó 2 meses para la sequía meteorológica, de entre 1 y 6 meses para la sequía agrícola, y de entre 6 y 24 meses o más para los análisis y aplicaciones de la sequía hidrológica (OMM, 2012). Los impactos agrícolas están relacionados con escalas

temporales semanales hasta 6-9 meses, mientras que los impactos de la sequía hidrológica y socioeconómica usualmente vienen a aparecer después de extensos rezagos en el tiempo. La ocurrencia de la sequía meteorológica, precede el comienzo de impactos específicos, y es relevante las características particulares de la regiones (Trnka, y otros, 2008). Así mismo, la variación de la intensidad, duración, frecuencia y cobertura espacial de los eventos climáticos hacen que unos generen más impactos que otros. Y es necesario tomar las definiciones de dichas características:

- Intensidad: Grado de precipitación temporal y/o severidad de los impactos asociados a esa temporalidad.
- Duración: Periodo durante el cual se presentó el fenómeno.
- Frecuencia: Recurrencia del evento, es decir, a la cantidad de eventos que se presentan con determinada periodicidad.
- Extensión: Cobertura espacial de influencia o el área geográfica afectada.

Una de las diferencias de la sequía sobre otras amenazas naturales radica en los efectos lentamente acumulados sobre un periodo de tiempo, con efectos que pueden durar años después de terminado el evento. El inicio y final de la sequía es difícil de detectar (Wilhite D. , 2000). El inicio de la sequía es difícil de determinar y por tal razón es frecuentemente denominado como un fenómeno progresivo. La primera evidencia de la sequía son los registros de lluvia sin embargo una escasez de precipitación no necesariamente resulta en sequía (USGS, 2016). Es posible identificar, a través de ciclos de diferente escala temporal, que cuando varios ciclos coinciden con valores negativos, es posible que se presenten eventos de sequía extrema (Hayes, Knutson, & Hu, 2005).

El clima ofrece cierto tipo de incertidumbres relacionadas con la variabilidad natural y las oscilaciones decadales observadas, así como con las proyecciones a escala interanual, Decadal y demás a futuro que se evidencia (UNESCO, 2016). Éste fenómeno usualmente tiene un inicio pausado y solo es identificada cuando está constituido (UNESCO, 2002). Toma entre tres o más meses para su desarrollo pero este periodo puede variar considerablemente, dependiendo del inicio de la ocurrencia del déficit de precipitación (Wilhite D. , 2000). La severidad de la sequía no solo depende de la duración, intensidad y extensión geográfica para un episodio específico de sequía, sino también de la demanda hídrica por actividades humanas y la vegetación en el

abastecimiento de agua de una región. Entonces se concluye que la sequía tiene ambos componentes –natural y social- (Wilhite D. , 2000). Análisis realizados por varios autores tales como Yevjevich en 1964, Brunet-Moret en 1975, Chervin en 1981, ofrecen argumentos en favor y en contra de una persistencia interanual que es más evidente después de años extremos (UNESCO - WMO, 1985). Si bien no existe un patrón claramente identificado de recurrencia de eventos, analizando los registros históricos se puede observar, para una misma intensidad del índice, la existencia del fenómeno a lo largo del tiempo, específicamente entre 1840 y 1970. (UNESCO - WMO, 1985). Los tiempos de respuesta a los déficits hídricos y la resistencia o resiliencia de cada sistema (hidrológico, agrícola, ambiental o social) pueden variar sustancialmente (Vicente Serrano, y otros, 2012). Su estudio puede ser agrupado en conocimiento de la circulación atmosférica asociada a la ocurrencia de sequía, Entender la frecuencia, severidad y probabilidad de ocurrencia para diferentes magnitudes. Comprender impactos de la sequía con pérdidas y costos y estrategias para reducir los impactos desde la sequía (Byun & Wilhite, 1999). Necesariamente se relaciona la probabilidad de ocurrencia para diferentes longitudes de tiempo orientado a la toma de decisiones (Tarawneh & Salas, 2009). El concepto de período de retorno es reconsiderado para su aplicación a diferentes tipos de eventos hidrológicos extremos (Fernandez, 1998).

Para flujo superficial y el flujo intermedio y entre el flujo intermedio y el flujo base no siempre son claras debido a que se interponen. Inicialmente, la curva de recesión es abrupta, ya que el flujo rápido (formado por escorrentía y/o flujo intermedio) sale de la cuenca. Se allana con el suministro de flujo retrasado de almacenes más profundos del subsuelo y puede llegar a ser casi constante si se sostiene por el flujo de salida de un glaciar o del almacenamiento de agua subterránea (Smakhtin V. , 2001). Para caudales mínimos un índice que considera la descarga que tiene un período de retorno de 10 años durante siete días consecutivos en un año (Fernandez & Salas, 1999).

3.4.3 Impactos

La sequía ya no se asocia principalmente con la pérdida o reducción de la producción agrícola. Hoy, los casos de sequía también se asocian con un impacto considerable en los sectores de la energía, el transporte, la salud, el ocio y el turismo y otros sectores. Igualmente importante es el impacto directo de la escasez de agua en el sector hidrológico, la energía y la seguridad alimentaria (Wilhite & GWP, 2014).

Los impactos de la sequía son dinámicos y resultado de las interacciones entre la oferta y la demanda y tal relación de los principales bienes económicos son muy variables de un país a otro, de una región a la siguiente y de un período a otro (Wilhite & Glantz, 1985). Los impactos de la sequía pueden ser clasificados en tres principales sectores: Económicos, ambientales y sociales. A continuación se ilustran los impactos asociados a cada sector de acuerdo a Wilhite (Tabla 2):

Tabla 2. Impactos asociados a diferentes sectores.

Económicos	Pérdida de la producción agrícola.
	Pérdida de producción lechera y ganadera
	Pérdida de la producción de madera
	Pérdida de la producción pesquera
	Pérdida del crecimiento económico nacional, retraso del desarrollo económico
	Pérdida de ingresos para los agricultores y otras personas directamente afectadas
Daños medioambientales a las especies	Pérdida de negocios recreativos
	Pérdida para los fabricantes y vendedores de equipo recreativo
	Hábitat de vida silvestre
	Erosión eólica e hídrica de los suelos
	Daño a las especies de peces
	Daño a las especies vegetales
	Efectos de calidad del agua (por ejemplo, concentración de sal)
Efectos de calidad del aire (polvo, contaminantes) calidad visual y paisajística (polvo, cubierta vegetal, Etc.).	
Sociales	Escasez de alimentos (disminución del nivel nutricional, malnutrición, hambruna)
	Pérdida de vidas humanas (por ejemplo, escasez de alimentos, calor)
	Seguridad pública contra incendios forestales y de alcance
	Conflictos entre usuarios de agua
	Problemas de bajo flujo relacionados con la salud (por ejemplo, disminución de los flujos de aguas residuales, Concentraciones, etc.)
	Desigualdad en la distribución de los impactos de sequía / alivio
	Disminución de las condiciones de vida en las zonas rurales
	Aumento de la pobreza
	Reducción de la calidad de vida
	Disturbios sociales
Migración de población (rural a zonas urbanas)	

Fuente: (Wilhite D. , 1993).

Algunas áreas podrían estar más en riesgo debido a una mayor exposición, lo cual inhibe o acorta el tiempo de recuperación entre sequías sucesivas. Como resultado de los cambios actuales y previstos en el clima y la frecuencia de los fenómenos climáticos extremos, como las sequías, es importante evaluar tanto la exposición histórica a las sequías como la exposición futura prevista (Wilhite & GWP, 2014). El continuo agotamiento normalmente ocurre debido al incremento de la presión sobre el recurso hídrico desde el crecimiento poblacional (Smakhtin & Schipper, 2008). A continuación se muestran los impactos de acuerdo a la categoría del evento Tabla 3.

Tabla 3. Impactos por sectores.

Categoría del impacto		Sequía meteorológica (clima)	Sequía Agrícola (suelo)	Sequía hidrológica (corrientes)
Agricultura	En seco	X	X	
	Irrigación		X	X
Ecosistemas	Terrestres	X	X	
	Acuáticos			X
Energía e industria	Hidroenergía			X
	Refrigeración			X
Navegación				X
Consumo humano				X
Recreación				X

Fuente: (Van Loon, 2015).

Los impactos directos por caudales mínimos o bajos se relacionan, entre otros, con la captación directa de los ríos para propósitos humanos, así como la reducida capacidad de dilución y autodepuración (Smakhtin V. , 2001). El desconocimiento de la dinámica de un corriente hídrico objeto de uso genera sobredemanda y promueve conflictos, especialmente en épocas de sequía.

3.4.4 Índices de sequía

El monitoreo de diferentes aspectos del ciclo hidrológico puede requerir una variedad de indicadores e índices. Los indicadores o índices de sequía se usan a menudo para ayudar a seguir las sequías (WMO & GWP, 2016) y como la sequía es de difícil definición, detección y medición, los investigadores se han esforzado en desarrollar índices para llevar a cabo éstas tareas (Hayes, Svodova, & Wilhite, 2000).

Los indicadores son variables o parámetros utilizados para describir las condiciones de sequía (WMO & GWP, 2016), sin embargo, el objetivo de los índices es proveer una simple evaluación de la Intensidad, duración y extensión espacial (Wu, y otros, 2007). Para seleccionar los índices o indicadores es importante reconocer el tipo de sequía, régimen climático y sectores afectados por la sequía (WMO & GWP, 2016). De igual manera, la WMO realiza una clasificación por facilidad de uso si cumplen diferentes criterios entre los que destaca la accesibilidad, complejidad de insumos, entre otros. En el Anexo A se puede consultar un listado de índices e indicadores para el análisis de sequía (WMO & GWP, 2016). A continuación se muestra una clasificación realizada por Dracup y otros autores para evaluar algunos de los índices (Tabla 4).

Tabla 4. Comparación de índices para sequía a través de evaluación multi-criterio.

Índice	Peso total	Puntajes (1-5)					
		Robustez	Tratabilidad	Transparencia	Sofisticación	Extensión	Dimensionalidad
Sequía meteorológica							
Deciles de lluvia	116	5	3	4	3	5	4
SPI	115	5	2	3	5	5	4
PDSI	61	2	1	1	4	4	1
Sequía hidrológica							
Total déficit de agua	102	3	4	5	2	3	5
Anomalia de flujo	89	2	4	4	2	3	5
SWSI	75	4	1	2	3	2	3
Sequía agrícola							
Humedad del suelo computada	102	4	1	5	4	3	5
Índice Z	77	3	2	2	4	3	1

Fuente: (Keyantash & Dracup, 2002).

▪ STANDARDIZED PRECIPITATION INDEX – SPI.

La evaluación de la sequía meteorológica es frecuentemente basada en la lluvia (Trnka, y otros, 2008). En 2009 la WMO recomendó el SPI como el principal índice de sequía meteorológica para vigilar y seguir las condiciones de sequía (WMO & GWP, 2016) de lo cual derivó una guía de usuario de SPI (OMM, 2012). El índice más utilizado para el análisis de sequía meteorológica es el SPI o Standardized Precipitation Index por sus siglas. Desarrollado en 1993 por investigadores de la Universidad Estatal de Colorado, buscando mejorar el monitoreo operacional del suministro de agua en Colorado que puede ser definido como la estandarización de la probabilidad de ocurrencia de una precipitación que finalice un periodo de sequía a diferentes escalas temporales dependiendo de los impactos. (Wu, y otros, 2007). Definen un “evento de sequía” como el período cuando el SPI es continuamente negativo y alcanza una intensidad de -1.0 o menos. La sequía terminaría entonces cuando se produzca un valor positivo. (Wu, y otros, 2007). A continuación se presenta la clasificación del SPI (Tabla 5 y Tabla 6):

Tabla 5. Clasificación SPI McKee.

Valores del SPI	Categoría	Tiempo
0 a -0.99	Sequía leve	34.1%
-1.00 a -1.49	Sequía moderada	9.2%
-1.50 a -1.99	Sequía severa	4.4%
≤ -2.00	Sequía extrema	2.3%

Fuente: (McKee, Doesken, & Kleist, 1993).

Tabla 6. Clasificación SPI NASA.

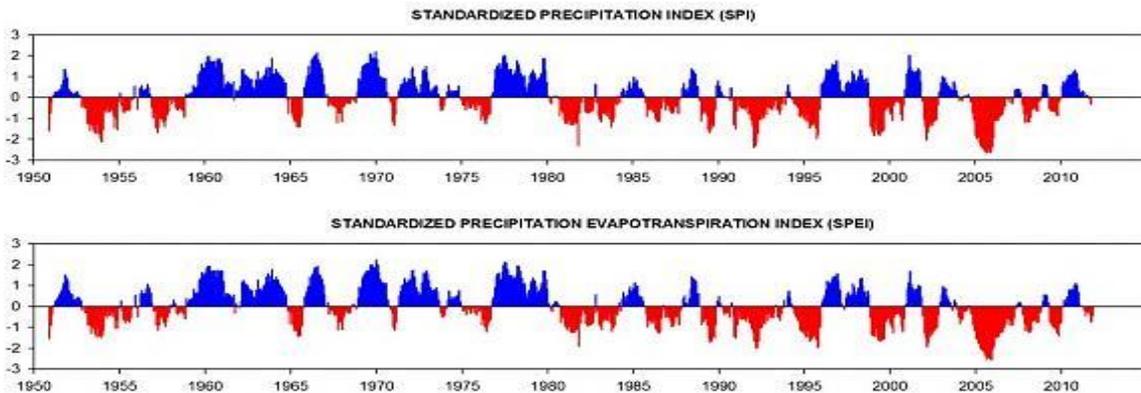
SPI	Probabilidad acumulada	Interpretación
-3	0.0014	Extremadamente seco
-2.5	0.0062	Extremadamente seco
-2	0.0228	Extremadamente seco (SPI < -2.0)
-1.5	0.0668	Severamente seco (-2.0 < SPI < -1.5)
-1	0.1587	Moderadamente seco (-1.5 < SPI < -1.0)
-0.5	0.3085	Cerca de lo normal
0	0.5	Cerca de lo normal
0.5	0.6915	Cerca de lo normal
1	0.8413	Moderadamente húmedo (1.0 < SPI < 1.5)
1.5	0.9332	Muy húmedo (1.5 < SPI < 2.0)
2	0.9772	Extremadamente húmedo (2.0 < SPI)
2.5	0.9938	Extremadamente húmedo
3	0.9986	Extremadamente húmedo

Fuente: (NASA, 2016)

Para su estimación se debe determinar la función de probabilidad de densidad – PDF. Seguidamente se estima la probabilidad acumulada. Se aplica la función normal inversa de Gauss sobre la probabilidad acumulada. Estadísticamente, la precipitación no tiene una distribución normal (Wu, y otros, 2007). El SPI tiene dificultad de aplicación en zonas áridas puesto que los valores iguales a cero para periodos cortos son comunes sin que ello implique un estado de sequía. En climas secos se recomienda prestar mayor atención a la duración de la sequía en lugar de sólo su severidad. (Wu, y otros, 2007). Algunas distribuciones estadísticas utilizadas con la normal, Gamma y Pearson III (Wu, y otros, 2007). Las escalas temporales usualmente consideradas son tres, seis, doce, venticuatro y cuarenta y ocho meses (McKee, Doesken, & Kleist, 1993). El SPI se puede calcular con tan sólo 20 años en datos, pero las series de tiempo deben tener un mínimo de 30 años de datos preferiblemente, incluso contando datos faltantes (WMO & GWP, 2016). Para una apropiada aplicación del índice se sugiere realizar una prueba de normalidad de la distribución de frecuencias de los valores del SPI bajo tres criterios (Wu, y otros, 2007): a) estadística de Shapiro-Wilk, (W), inferior a 0,96, b) Valores de probabilidad (p) inferiores a 0,10 y c) El valor absoluto de la mediana mayor que 0,05. Si no se cumplen simultáneamente las condiciones anteriores, la distribución es normal. Los impactos no son estructurales y afectan una gran extensión de áreas geográficas (Wilhite D. , 2000). La interpretación y el conocimiento de la climatología local son clave en la interpretación y para entender cómo el SPI detecta, rastrea y representa las sequías históricas es una clave importante para reconocer y desarrollar alertas para el monitoreo

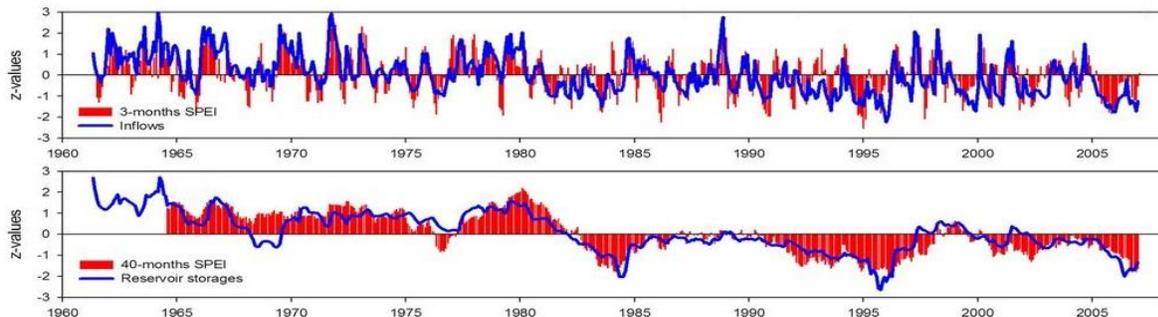
operacional de las sequías futuras (Wu, y otros, 2007). Uno de los métodos ampliamente utilizado para predecir la ocurrencia de la sequía considera el SPI basado únicamente en precipitación mensual, permite rápidamente predecir la ocurrencia de futuros eventos de sequía (Bordi & otros, 2005). El SPI ha tenido una variación que permite incluir información relativa a evapotranspiración a partir de la temperatura y se denota SPEI. A continuación se muestra un ejemplo (Figura 22) que permite comparar los resultados del SPI frente a los del SPEI. Tales figuras permiten observar las diferencias entre el SPI y el SPEI mientras que la Figura 23 muestra como a partir de los índices de precipitación estandarizada, es posible reconocer el impacto sobre caudales y reservorios de almacenamiento (Lorenzo, y otros, 2010). Dado que el índice está normalizado, los climas húmedos y secos se pueden representar del mismo modo, por lo que también se puede hacer un seguimiento a los periodos húmedos (OMM, 2012).

Figura 22. Comparativo entre SPI y SPEI.



Fuente: spei.csic.es, 2017.

Figura 23. Resultado de SPEI frente a caudales y reservorios en la cuenca del Tajo, España.



Fuente: spei.csic.es, 2017.

A continuación se presenta una interpretación temporal del SPI (OMM, 2012): **1 mes:** Se asocia con tipos meteorológicos de sequía junto con la humedad del suelo y el estrés de los cultivos a corto plazo, especialmente en etapa de crecimiento. **3 meses:** Refleja las condiciones de humedad a corto y mediano plazo, y en términos agrícolas, podría ser eficaz para poner de relieve la existencia de condiciones de humedad. **6 meses:** Podría reflejar caudales fluviales y niveles de almacenamiento anómalos. **9 meses:** Indica pautas de precipitación interestacionales y sequedad en la agricultura. **12-24 meses:** Para periodos largos, el SPI tiende a situarse en torno a cero, a menos que se esté produciendo una tendencia húmeda o seca característica y se pueden vincular con cauces fluviales, niveles de los reservorios y niveles subterráneos.

Fortalezas: Insumo no es complejo y es de fácil acceso. Las diferentes escalas en las que puede ser estimado. Tiene coherencia espacial. Permite realizar comparaciones entre distintas zonas con climas distintos (OMM, 2012). Aplicable al abastecimiento de agua (Wu, y otros, 2007). El SPI es un valioso estimador de la severidad de sequía meteorológica (Keyantash & Dracup, 2002). SAT por sequía. Existe suficiente información técnica en la literatura científica para su aplicación (WMO & GWP, 2016). **Debilidades:** No siempre refleja condiciones de sequía o inundación. Experticia para elegir la distribución estadística más adecuada. No identifica inicio o fin de la sequía.

- **PALMER DROUGHT SEVERITY INDEX (PDSI).**

Desarrollado para identificar afectación de sequía agrícola y es muy utilizado alrededor del mundo (WMO & GWP, 2016). El índice se basa en el concepto de oferta y demanda hídrica a partir de la ecuación de balance hídrico incorporando lluvia antecedente, humedad y demanda en la superficie, estimada por el método de Thornthwaite (Trnka, y otros, 2008). El mismo PDSI puede describirse como una salida relativa acumulada de las condiciones medias locales en la oferta y demanda de humedad atmosférica en la superficie (Palmer, 1965). Usado inicialmente en Kansas e Iowa, (USA), originalmente a partir de constantes empíricas, propiedades del suelo asumidas y nueve estaciones de donde se tomaron las características climáticas (Trnka, y otros, 2008). **Fortalezas:** Representa episodios prolongados de sequía (Trnka, y otros, 2008). Muy utilizado. Considera diferentes parámetros del balance hídrico. Existen numerosos artículos científicos asociados al índice (WMO & GWP, 2016). **Debilidades:** El PDSI tiene una escala temporal limitada (9 meses) y reduce el uso para el monitoreo hídrico en largas

escalas temporales importante en algunos territorios (Wu, y otros, 2007). No es útil para alerta temprana por el rezago mensual que implica el conocimiento de la humedad del suelo. Usado para identificar afectaciones sobre la agricultura (WMO & GWP, 2016).

- **PALMER MOISTURE ANOMALY INDEX (Z INDEX).**

Medida de la anomalía de la humedad superficial para un mes normal sin consideraciones de condiciones antecedentes. Es básicamente la salida de humedad (d) ajustado por un factor de amplitud llamado características climáticas, el cual se denota como K. Derivado del PDSI, el índice responde a condiciones de corto plazo permitiendo identificar rápidamente el desarrollo de las condiciones de sequía (WMO & GWP, 2016).

Fortalezas: Identifica rápidamente el inicio y fin de la sequía. Representa mejor el balance hídrico por considerar la humedad del suelo y existen numerosos artículos científicos asociados al índice (WMO & GWP, 2016). **Debilidades:** No considera condiciones antecedentes. Requiere de datos completos, en especial, lo relacionado con humedad del suelo. La escala de análisis es de aproximadamente 9 meses.

- **NORMALIZED DIFFERENCE VEGETATION INDEX NDVI.**

Desarrollado por Tarpley y Kogan de la National Oceanic and Atmospheric Administration NOAA en Estados Unidos, utiliza el índice global de vegetación el cual es producido mediante cartografía diaria con una resolución de 4 km. Mide el vigor de la vegetación durante un periodo de siete días y puede identificar el estrés hídrico relacionado con la sequía sobre la vegetación (WMO & GWP, 2016). Tiene un enfoque especializado hacia coberturas vegetales, por tanto es de interés para monitorear sequías agrícolas.

Fortalezas: Uso de datos satelitales para monitorear vegetación y es de alta resolución y de gran cobertura espacial (WMO & GWP, 2016). **Debilidades:** Procesamiento de información satelital - cobertura vegetal y la información satelital no tiene series históricas extensas (WMO & GWP, 2016).

- **SURFACE WATER SUPPLY INDEX (SWSI).**

El índice de abastecimiento de agua superficial, SWSI por sus siglas en inglés (Surface Water Supply Index), comenzó a ser usado en Colorado para monitorear precisamente el abastecimiento de agua. Basado en el análisis de precipitación, fracción de nieve, corriente del flujo y Niveles de los embalses en una cuenca, ofrece un valor único para

una cuenca en especial, limitando la comparación entre cuencas (Wu, y otros, 2007). Utiliza el PDSI e incluye datos del abastecimiento hídrico e identifica sequías hidrológicas y sus fluctuaciones (WMO & GWP, 2016). **Fortalezas:** Es de especial interés para prestadores del servicio de acueducto. Proporciona una buena lectura de las condiciones hidrológicas para una cuenca en particular (WMO & GWP, 2016). **Debilidades:** No permite una adecuada comparación entre cuencas. A medida que las fuentes de datos cambian o se incluyen datos adicionales, todo el índice debe someterse a un nuevo cálculo. A continuación (Tabla 7) se presentan las categorías equivalentes para algunos de los índices más comunes (Trnka, y otros, 2008):

Tabla 7. SPI, Índice Z de Palmer, y PDSI de acuerdo a Heim (2002).

SPI	Índice Z	PDSI	Categoría de la sequía
≥ 2.00	≥ 3.50	≥ 3.50	Extremadamente húmedo
1.50 to 1.99	2.50 to 3.49	3.00 to 3.99	Muy húmedo
1.00 to 1.49	1.00 to 2.49	2.00 to 2.99	Moderadamente húmedo
-0.99 to 0.99	-1.24 to 0.99	-1.99 to 1.99	Rango normal
-1.00 to -1.49	-1.25 to -1.99	-2.00 to -2.99	Moderadamente seco
-1.50 to -1.99	-2.00 to -2.74	-3.00 to -3.99	Severamente seco
≤ -2.00	≤ -2.75	≤ -4.00	Extremadamente seco

▪ Integrated Climatological Drought Indicator ICDI.

El presente indicador integra los resultados de los indicadores SPI, Z-índice y PDSI. Combina el número de eventos y su duración y permite la visualización del riesgo por sequía sobre un área utilizando un mapa simple (Trnka, y otros, 2008). **Fortalezas:** Evaluación del riesgo por sequía. No depende de las características particulares de alguna región. **Debilidades:** No muestra la intensidad de eventos individuales (Trnka, y otros, 2008). Arrastra las debilidades de los otros índices usados y que se han presentado anteriormente para cada uno. Otro tipo de indicadores integrados han sido analizados. El CDI se construyó sobre la base de 4 indicadores: flujo de corriente (Q), NDVI, P y temperatura de la superficie terrestre (LST) (Wassem, Ajmal, & Kim, 2015).

3.4.5 Gestión de sequías

La sequía es una de las amenazas naturales más complejas y menos entendidas, definida por Tannehill en 1974 como un fenómeno en progreso (Wilhite D. , 1993). La escasez de agua provocada por la sequía se debe más a una mala planificación que al efecto directo de la sequía (Wilhite & GWP, 2014). Las sequías han ocasionado entre 1900 y 2013 diferentes pérdidas humanas y económicas que se muestran en la Tabla 8 (UNESCO, 2014):

Tabla 8. Pérdidas de vidas humanas y económicas por sequía.

	Continente	# eventos	Muertes	Total afectados	Daños (\$US)
África	Sequía	291	847 143	362 225 779	\$ 2,920,593
	Promedio por evento		2 911.1	1 244 762.2	\$ 10,036.40
América	Sequía	134	77	69 505 391	\$ 50,471,139
	Promedio por evento		0.6	518 696.9	\$ 376,650.3
Asia	Sequía	153	9 663 389	1 707 836 029	\$ 44,251,865
	Promedio por evento		63 159.4	11 162 327	\$ 289,227.9
Europa	Sequía	42	1 200 002	15 488 769	\$ 25,481,309
	Promedio por evento		28 571.5	368 780.2	\$ 606,697.8
Oceanía	Sequía	22	660	8 034 019	\$ 12,303,000
	Promedio por evento		30	365 182.7	\$ 559,227.3

Fuente: (UNESCO, 2014).

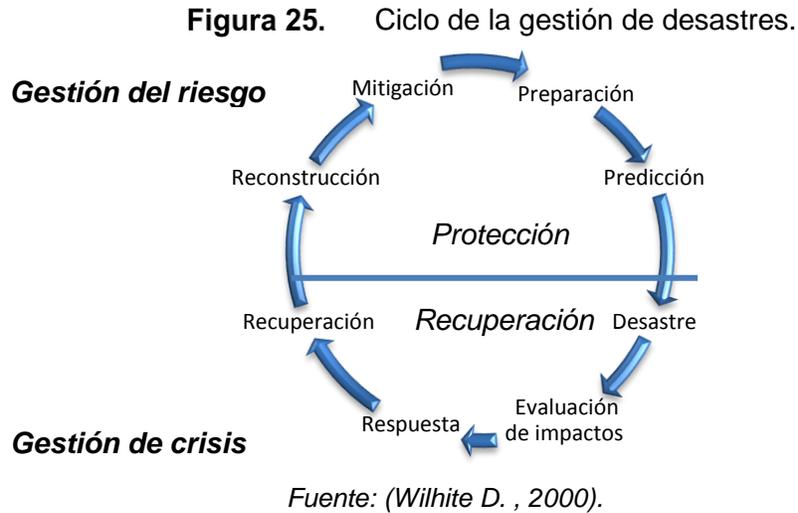
La existencia de periodos o eventos asociados a sequía incrementan considerablemente los conflictos por la competencia cuando el agua que escasea. Es difícil alterar la ocurrencia de la sequía meteorológica puesto que obedece a patrones de circulación global en la atmósfera. La vulnerabilidad, por otra parte, está determinada por factores sociales tales como población, características demográficas, tecnología, política y comportamiento (ver Figura 24) (Wilhite D. , 2000).

Figura 24. Interacción de la sequía y los componentes del riesgo.

Fuente: (Wilhite D. , 2000).

Cuantificar impactos son tareas mucho más difíciles para la sequía que para otras amenazas. Una clasificación consolidada de las medidas de mitigación de la sequía distingue medidas como aumentar el suministro de agua, reducir demandas y minimizar impactos (Rossi & Cancelliere, 2012). Para la descripción de la amenaza es importante: El evento que incluye la caracterización a partir de la frecuencia, intensidad y datos observados y el impacto que incluye la tipología, criterios socioeconómicos y ambientales (ENHANCE, 2016). En términos generales el indicador de escasez de agua es definida como la proporción de recursos hídricos disponibles frente a la población, estimando la disponibilidad promedio de agua por persona en una unidad de análisis (Salmivaara, y otros, 2014). El análisis estadístico de las características de la sequía puede complicarse por sequías consecutivas. Autores como Zelenhasic y Salvai en 1987 excluyeron las

sequías con un volumen de déficit inferior al 0,5% del volumen máximo de déficit observado (Tallaksen, Madsen, & Clausen, 1997). El enfoque de gestión de crisis se presenta en la Figura 25 e intenta integrar los componentes de la gestión de desastres:



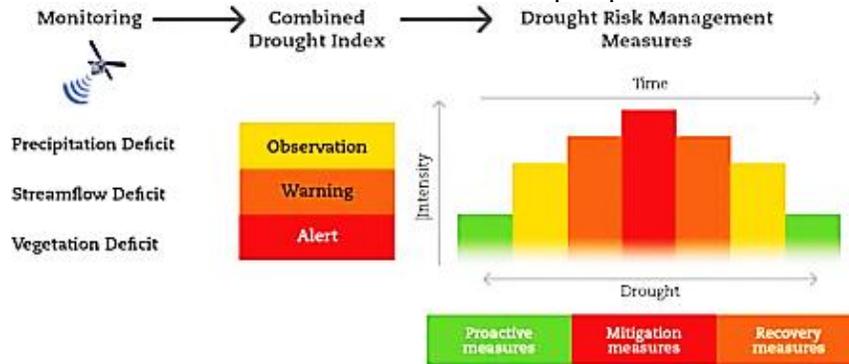
Cuatro lecciones para una respuesta más efectiva han sido aprendidas por los gobiernos: 1) planes de información y difusión fiables y oportunos; 2) procedimientos de evaluación del impacto objetivos y fiables; 3) procedimientos objetivos y oportunos de designación y 4) programas apropiados de desastres y sistemas eficaces de administración y entrega (Wilhite D. , 1990). La naturaleza de la planificación se rige por el denominado ciclo hidro-ilógico que se muestra a continuación con la Figura 26:



Adaptado de (Wilhite & GWP, 2014).

Es posible romper el ciclo y todo comienza por las personas y las comunidades, reduciendo la vulnerabilidad (Wilhite D. , 2014). La 0 expone el esquema de combinación de índices desde el monitoreo hasta la gestión del riesgo (UNESCO, 2016).

Figura 27. Indicadores combinados de sequía para tomadores de decisiones.



Fuente: UNESCO, 2016.

Información relevante en términos de gestión son pérdida total de vidas, pérdida económica total, efectos sociales, impacto a largo plazo y/o acumulado, agresividad, ocurrencia. La pérdida total de vidas es indirecta y es subvalorada. Situaciones como guerras civiles y conflictos políticos incrementan la vulnerabilidad a la sequía (Wilhite D. , 2000). Algunos autores proponen objetivos y medidas de acuerdo con el estado de la sequía así: Estado normal ($0.50 < I < 1$): estrategia de planeación, pre alerta ($0.30 < I \leq 0.50$): estrategia de control e información, alerta ($0.15 < I \leq 0.30$): Táctica de conservación y emergencia ($0 < I \leq 0.15$): Restricción (Monzonís, y otros, 2015). Es posible reducir la brecha informativa con datos de teledetección por satélite de tal forma que se puede mejorar la capacidad de rastrear la sequía, especialmente a escala mundial (Hayes, y otros, 2012). El enfoque para la gestión del riesgo de sequía (DRM) en Asia y África propone el esquema de la Figura 28 (United Nations Development Programme, 2012):

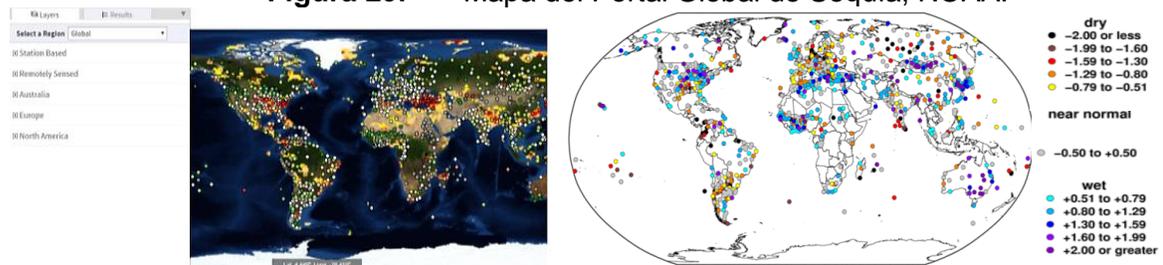
Figura 28. Enfoque de la gestión del riesgo por sequía.



Fuente: (United Nations Development Programme, 2012):

El portal global de monitoreo de sequía (GDMP) tiene sus inicios a partir del portal de sequía para los Estados Unidos con el National Integrated Drought Information System (NIDIS). Con un monitoreo desde abril del año 2010, cuenta con la asistencia de instituciones como la NOAA, NIDISM USDA, NDMC, USGEO, CGEO, entre otras. El portal utiliza como índice el SPEI y los insumos provienen del Global Precipitation Climatology Centre (GPCC) para el caso de precipitación mensual y el conjunto de datos por grilla de la NOAA, NCEP, CPC y GHCN_CAMS, para el caso de la temperatura. La evapotranspiración es obtenida a través de la ecuación de Thornthwaite (Brewer & Heim Jr, 2011). La información es posible consultarla en el portal www.drought.gov, y en conjunto con los resultados del SPI 1 mes se muestra a continuación (Figura 29):

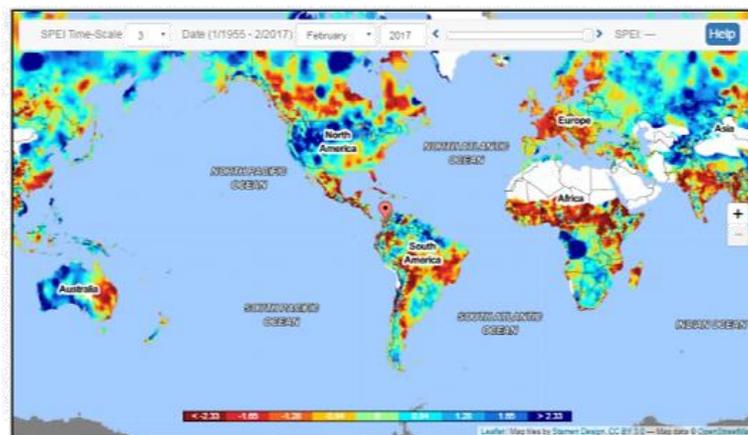
Figura 29. Mapa del Portal Global de Sequía, NOAA.



Fuente: portal drought.gov, 2017.

Otro portal de importancia ha sido desarrollado con el apoyo del Gobierno de España, el Consejo Superior de Investigaciones Científicas CSIC, el Instituto Pirenaico de Ecología IPE y la Estación Experimental de Aula Dei EEAD. Los autores son los españoles Santiago Beguería, Borja Latorre, Fergus Reig, Sergio M. Vicente-Serrano (Figura 30).

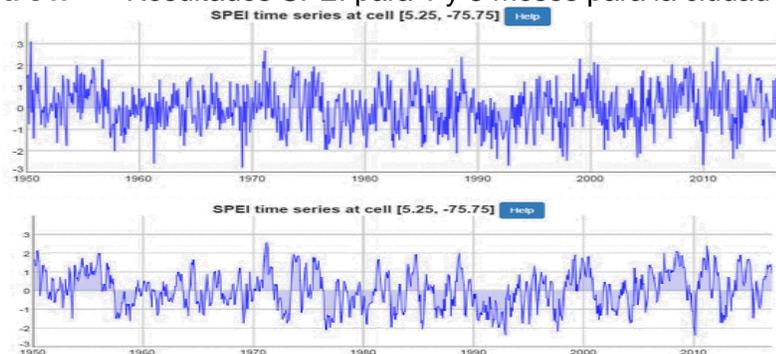
Figura 30. Monitor Global de Sequía por SPEI.



Fuente: <http://spei.csic.es/index.html>.

El portal se denomina SPEI Global Drought Monitor y ofrece información casi en tiempo real sobre las condiciones de sequía a escala global, con una resolución espacial de 0,5 grados y una resolución temporal mensual. El periodo de referencia es de enero de 1950 a diciembre de 2010. A continuación se muestran algunos resultados obtenidos para Manizales y descargados directamente del Portal (Figura 31).

Figura 31. Resultados SPEI para 1 y 3 meses para la ciudad de Manizales.



Fuente: <http://spei.csic.es/index.html>.

Para Latinoamérica y el caribe la Universidad de Nebraska desarrolló el portal LAFDM, que será descrito en el contexto latinoamericano. La gestión sostenible de los recursos hídricos y de la tierra, SLWRM por sus siglas en inglés, propone un ciclo virtual para el mejoramiento de las condiciones físicas (UNCCD, 2009): Mejorar las condiciones del ecosistema terrestre, mejor infiltración de lluvia, aumento del almacenamiento de agua en los suelos, mayor agua disponible y mayor biomasa, mayores alimentos. Una de las medidas ampliamente utilizadas es la restauración y conservación de ecosistemas como los humedales y para tal fin se ha definido la convención RAMSAR (MAVDT, 2005). La comunidad juega un papel importante; las personas deben ser capaces de comprender mejor los riesgos a los que están expuestos (Hashimoto, Stendinger, & Loucks, 1982). En resumen, existe una necesidad fundamental de hacer la transición de la gestión de crisis (medidas reactivas) hacia la gestión de riesgos.

3.4.6 Diferencia entre sequía y desertificación

Existe una diferencia sustancial entre las condiciones de sequía, aridez, desabastecimiento hídrico y desertificación. La desertificación, degradación de tierras y

sequía tienen impactos negativos sobre la disponibilidad, cantidad y calidad de los recursos hídricos como resultado de la escasez de agua. La desertificación tiene las siguientes definiciones:

- Degradación de las tierras en las zonas áridas, semiáridas y subhúmedas secas resultante de diversos factores tales como las variaciones climáticas y las actividades humanas – Convención de las Naciones Unidas para la Lucha contra la Desertificación – (UNESCO - UNCCD, 1997) (UNCCD, 2011).
- Es un desequilibrio permanente inducido por el hombre en la disponibilidad de agua, que se combina con el deterioro del suelo, el uso inapropiado de la tierra, la extracción de agua subterránea, y puede dar lugar a crecientes inundaciones, pérdida de ecosistemas ribereños y deterioro de la capacidad de carga de los ecosistemas (UNESCO, 2002).

De otro lado la aridez tiene las siguientes definiciones:

- Es un desequilibrio natural permanente en la disponibilidad de agua que consiste en una baja precipitación media anual, con alta variabilidad espacial y temporal, resultando en baja humedad general y baja capacidad de carga de los ecosistemas (UNESCO, 2002).
- Relacionado con zonas en la que la evapotranspiración potencial es siempre mayor que la precipitación (OMM, 2012).
- Clima caracterizado por la escasez de lluvias, es decir, clima en el que las lluvias no sobrepasan los 200 mm/año (UNESCO - UNCCD, 1997).

Es un proceso dinámico que se observa en ecosistemas secos y frágiles. Incluye áreas terrestres (suelo, subsuelo, acuíferos), poblaciones animales y vegetales, y los establecimientos humanos y sus servicios (UNESCO - UNCCD, 1997). La diferencia radica en la persistencia del déficit de precipitación o de eventos de sequía (Tabla 9).

Tabla 9. Diferencias entre la aridez y la sequía.

Régimen hídrico de escasez	Produce en la naturaleza	Inducido por el hombre
Permanente	Aridez	Desertificación
Temporal	Sequía	Desabastecimiento hídrico

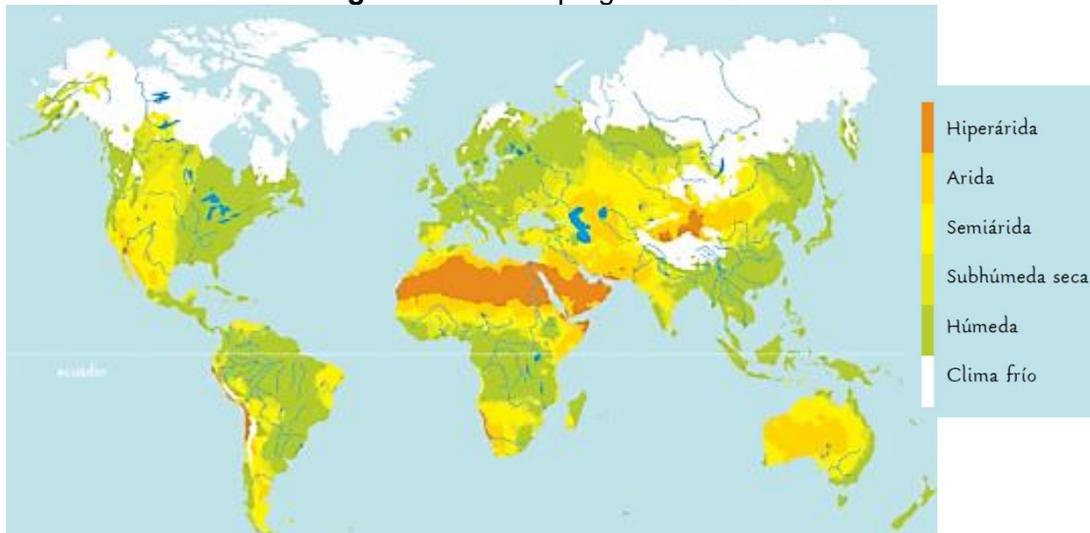
Fuente: (Vlachos & James, Adaptado UNESCO., 1983)

En el plano ambiental, las regiones secas afectadas particularmente por la desertificación se caracterizan según (UNESCO - UNCCD, 1997) por precipitaciones bajas, poco

frecuentes, irregulares e impredecibles, grandes variaciones entre la temperatura diurna y la nocturna, suelos pobres en materia orgánica, escasez de agua para el consumo y biota adaptada a las condiciones climáticas (resistentes al calor y a la escasez).

La desertificación es atribuible tanto a variaciones climáticas como a actividades humanas; causada por interacciones complejas entre factores físicos, biológicos, políticos, sociales, culturales y económicos (UNESCO - UNCCD, 1997). La aridez es el resultado de la interacción entre diferentes factores climáticos tales como la lluvia, la temperatura, el viento y la evotranspiración. La combinación de estos factores determina el crecimiento de las plantas y la capacidad de los animales y de los seres humanos para vivir convenientemente en un lugar natural de características hostiles tal como se puede identificar en la Figura 32 (UNESCO - UNCCD, 1997).

Figura 32. Mapa global de zonas áridas.



Fuente: (UNESCO - UNCCD, 1997).

Las consecuencias más relevantes (UNESCO - UNCCD, 1997) son:

- La erosión o pérdida de las partículas y nutrientes de los suelos;
- Incremento de la salinidad de los suelos debido a una alta tasa de evaporación, que provoca un aumento en la cantidad de sales minerales en los suelos, lo que los hace inapropiados para la actividad agrícola.
- La cubierta vegetal no tiene tiempo para recuperarse, especialmente durante los períodos de pastoreo intensivo.

- La degradación de la tierra asociada a la deforestación y destrucción de los ecosistemas boscosos trae como consecuencia una pérdida importante en la fertilidad de los suelos; adicional a la erosión pluvial y eólica.

La lucha contra la desertificación (UNESCO - UNCCD, 1997) comprende:

- Prevenir o atenuar la degradación de las tierras.
- Reparar las tierras y los suelos degradados.
- Informar y sensibilizar a los afectados por los problemas de la desertificación.
- Mejorar el contexto social: luchar contra la pobreza, mejorar condiciones de salud, desarrollar educación sobre gestión sostenible y evitar conflictos.

Los ambientes expuestos a aridez o sequía tienden a ser susceptibles de erosión hídrica puesto que la sequedad en los suelos, la pérdida de cobertura vegetal y exposición de suelos orgánicos y residuales representan factores detonantes para que se presente erodabilidad hídrica (retorno de lluvias) y eólica (previo a la presencia de lluvias).

3.4.7 Desabastecimiento y Racionamiento hídrico

La escasez de agua es el desbalance a largo plazo entre la disponibilidad de los recursos hídricos y la demanda (UNCCD, 2009). Se estima que el 40% de la población del mundo sufre de escasez de agua (UNCCD, 2011). La consideración de los impactos humanos directos sobre el abastecimiento mundial de agua sigue siendo un aspecto poco articulado pero potencialmente importante de la cuestión del cambio global más grande (Vorosmarty, y otros, 2000).

El agua disponible en una región depende inicialmente del clima y posteriormente de la topografía y geología. Igualmente la suficiencia depende de la demanda en el lugar que lo requiere (UNESCO, 2002). Sumado a lo anterior están los factores físicos del área aferente tales como coberturas vegetales y actividades humanas que alteren las condiciones de calidad. El desabastecimiento hídrico es una característica predominante en tierras secas. En las zonas áridas y semiáridas, el balance hídrico es negativo en el año, lo que significa que más agua se evapora que precipita durante un año. Por lo tanto, el agua es escasa la mayor parte del tiempo y los asentamientos humanos pueden agrupar alrededor de fuentes raras de agua tales como ríos, manantiales, pozos, captaciones de agua, embalses y oasis (UNCCD, 2011).

Menor demanda de agua y cultivos resistentes a la sequía pueden ser una alternativa de adaptación (UNCCD, 2009). El desabastecimiento de agua puede ser entendido como la falta de agua de calidad aceptable; bajos niveles de suministro de agua, en un momento y en un lugar determinados, respecto a los niveles de suministro diseñados, como resultado de recursos hídricos insuficientes, ausencia de infraestructuras o un inadecuado mantenimiento de las mismas; o bajos niveles de recursos hídricos como consecuencia de diferencias estacionales o anuales en el clima o por muchos otros factores hidrológicos o hidrogeológicos.

De otro lado, el estrés hídrico puede ser entendido como los síntomas de la escasez o desabastecimiento de agua, por ejemplo, aumento de la competencia y de los conflictos entre usuarios, empeoramiento de la calidad y fiabilidad del servicio, pérdida de cosechas e inseguridad alimentaria. Este término se usa para describir una gran variedad de circunstancias y causas y existen algunos Índices de Estrés Hídrico (FAO, 2013).

Otra definición para el desabastecimiento sugiere que es un desequilibrio de agua inducido por el hombre, pero temporal, que incluye la sobreexplotación de las aguas subterráneas y superficiales, la degradación de la calidad del agua y se asocia a menudo con el uso perturbado de la tierra y la alteración de la capacidad de carga de los ecosistemas (UNESCO, 2002).

La escasez de agua es definida como un exceso de demanda de agua para el suministro disponible. La escasez de agua es un concepto relativo y dinámico, y puede aparecer a cualquier nivel de suministro o demanda, pero también es una construcción social: todas sus causas están relacionadas con la intervención humana en el ciclo del agua. Cambia con el tiempo a consecuencia de la variabilidad hidrológica natural, pero varía aún más en función de los modelos existentes de gestión, planificación y política económica. Cabe esperar que la escasez de agua se intensifique con casi todas las formas de desarrollo económico, pero si se identifican correctamente, muchas de sus causas pueden anticiparse, evitarse o mitigarse. (FAO, 2013).

Años atrás los habitantes del territorio Caldense han sido testigos de la abundancia de nuestras fuentes hídricas, no obstante las condiciones han cambiado. En la actualidad se

presenta una mayor demanda de recursos naturales producto básicamente del crecimiento poblacional y a la vez se presenta una mayor variación de las condiciones climáticas que resultan en mayor frecuencia eventos extremos (olas invernales y de escasez) y éste último, aunado a mayor aporte de contaminantes, deriva en conflictos por la alta presión y la competencia que implica el acceso al agua.

Para entender la escasez es necesario comprender las leyes físicas propuestas por la FAO y descritas a continuación:

- El agua es un recurso renovable.
- El agua está en un estado continuo de cambio.
- El balance hídrico está gobernado por la conservación de la masa.
- Todos los terrenos de una cuenca fluvial están conectados por el agua.
- Las funciones de limpieza y dilución de los ecosistemas acuáticos se ven forzadas hasta sus límites, dando lugar a la acumulación de sustancias contaminantes.
- conjunto de bienes y servicios del ecosistema acuático, con límites.
- La contabilidad del agua deben ser la base estratégica para afrontar la escasez.
- Las auditorías del agua deben considerar la gobernanza, instituciones, finanzas, accesibilidad e incertidumbre.

Los principios para la acción propuestas por la FAO son:

- Conocimiento: basar las estrategias en un buen entendimiento de las causas y efectos de la escasez de agua.
- Impactos: evaluar todos los costes y beneficios usando criterios de decisión sistemáticos e integrales.
- Capacidad: asegurar el nivel adecuado de gobernanza y capacidad institucional.
- Especificidad según el contexto: adaptar la respuesta a las condiciones locales.
- Coherencia política: coordinación entre las políticas hídricas, agrícolas y de seguridad alimentaria.
- Preparación: anticipar los cambios a través de una toma de decisiones sólida y de una gestión adaptativa.

Las acciones de respuesta a la escasez de agua por el área política según la FAO se presentan en la Tabla 10:

Tabla 10. Acciones de respuesta frente a la escasez.

Área política	Mejora del suministro	Gestión de la demanda
Agua	Aprovechamiento de aguas, desalinización y descontaminación.	Asignación intersectorial; aumento de la eficiencia del uso de agua por sectores.
Agricultura	Almacenamiento dentro de la Finca, aprovechamiento de aguas subterráneas, reuso y reciclaje.	Aumento de la productividad de los cultivos, reducción de las pérdidas, limitación de las áreas de regadío, asignación intrasectorial
Seguridad alimentaria	Importación de alimentos, mejor almacenamiento y distribución.	Reducción del desperdicio en la cadena alimentaria; cambios en la dietas.

La presente investigación tiene como objeto lo relacionado con el mejoramiento del suministro hídrico para el abastecimiento. La teoría de las rachas ha sido ampliamente utilizada para asociar diferentes magnitudes sobre las que realizar su caracterización. Estas pueden ser la duración, la severidad, la intensidad media, la intensidad máxima, etc. La caracterización basada en el valor directo de cualquiera de estas magnitudes puede ser útil para comparación entre sequías producidas en el mismo lugar y analizadas con la misma variable indicadora. Sin embargo, no es posible su comparación con otro tipo de variables o entre análisis resultantes en lugares diferentes, donde la comparación puede aparecer inconsistente (Gonzalez & Marco, 2005).

Las medidas para atender el posible desabastecimiento son múltiples. Van desde la eficiencia y ahorro o conservación del agua, transvases, cosecha de agua, mejora de precipitación, uso de agua marina o reuso de aguas residuales (Cheng, Hu, & Zhao, 2009). Así mismo, se plantea la construcción de reservorios o presas de regulación, como en el caso de la cuenca del Huasco con la presa Santa Juana en Chile, en donde la presencia del reservorio proporciona resiliencia contra sequías a corto plazo sin embargo, el estudio del mismo indicó que el embalse no podía aliviar plenamente las grandes sequía plurianuales y se recomienda aumentar la resiliencia de otras maneras. También se presenta un rezago de sincronización de eventos de sequía mostrando una redistribución de agua para las actividades humanas (Rangecroft, y otros, 2016). Lo anterior demuestra que las soluciones planteadas para hacer frente al desabastecimiento deben ser evaluadas de manera particular, puesto que el cambio en el régimen hídrico, así como en la redistribución espacial y temporal del agua no siempre trae consigo efectos positivos para el ser humano y los ecosistemas. Por lo que se refiere al valor social del agua, es importante recordar que la ausencia del vital líquido perturba el estilo de vida de las personas. Las necesidades urbanas difieren de las rurales en cuanto al

uso pues mientras en las ciudades los mayores usos se presentan para consumo humano y para sectores industrial y comercial, servicio prestado generalmente por una Empresa con capacidad técnica y operativa, en la zona rural los usos se concentran en magnitud sobre actividades agrícolas, pecuarias y finalmente para consumo humano doméstico.

3.4.8 Contexto mundial

El estrés hídrico afecta actualmente a 1.700 millones de personas, y se estima que podría afectar a 5.000 millones en el 2025 (UNESCO - UNCCD, 1997). Durante la década de 1990 el 40% de la población mundial sufrió una grave escasez de agua, condiciones agravadas por cambio climático (UNESCO, 2016). Un total de más de 110 países poseen tierras áridas más o menos degradadas. Las tierras afectadas por desertificación en África ascienden a mil millones de hectáreas, en Asia a mil cuatrocientos millones, mientras que en América del Norte cuenta con un 74% de tierras en vía de desertificación (UNESCO - UNCCD, 1997). Europa central ha tenido episodios de sequía durante los años 2000, 2001 y 2003, éste último con un periodo pronunciado, con temperaturas extremadamente altas (Trnka, y otros, 2008). El proyecto de asistencia entre pares para la gestión de riesgo de sequía de África y Asia buscó facilitar el intercambio de conocimientos y cooperación técnica entre los países propensos a la sequía para promover buenas prácticas en el proyecto Gestión del Riesgo de Sequía (DRM). (United Nations Development Programme, 2012). Sobre India destaca la presencia de monzones (UNESCO - WMO, 1985) y la gestión y administración hídrica no sólo concibe el abordar el fenómeno de sequía, sino el de inundaciones como eventos complementarios en una gestión conjunta. Para ello se ha propuesto un proyecto relacionado con el almacenamiento subterráneo sobre la cuenca del río Ganges por medio de celdas de recarga que facilitan la infiltración (Pavelic, y otros, 2015).

Sobre la costa Ibérica de España se ha utilizado frecuentemente el SPI y según los investigadores, hubo 36 años extremadamente secos y 28 años muy húmedos desde finales del siglo XVII y Lo que se está viendo durante el siglo XX y lo que llevamos del XXI es un aumento en la recurrencia de los fenómenos extremos (Tejedor, y otros, 2016). Para el experto, las predicciones (variabilidad y tendencia) de precipitaciones todavía no son tan fiables como las de temperatura por múltiples factores (SINC, 2017). Otros estudios sugieren que los dos indicadores de sequía (SPI – SPEI para el periodo entre

1961 y 2006), efectivamente identifican déficit hídrico en varias escalas temporales y son las mejores herramientas para estudiar la variabilidad temporal de los fenómenos climáticos (Lorenzo, y otros, 2010). Los resultados indican que en las últimas décadas el SPEI posee un aumento en la severidad respecto al SPI (Vicente, y otros, 2011). Igualmente en Italia ha sido exitosamente utilizado el SPI en el periodo entre 1921 y 2003, encontrando tendencias hacia periodos más secos (Cancelliere, y otros, 2007), (Bonaccorso, Bordi, Rossi, & Sutura, 2003). En países como Austria, Pakistán Irán y Vietnam, los estudios indican que la duración de las sequías depende de los procesos hidrológicos terrestres (Van Loon & Laaha, 2015), (Morid, Smakhtin, & Moghaddasi, 2006) mientras que los efectos se presentan simultáneamente en grandes extensiones de terreno (Xie, Ringler, Zhu, & Ahmad, 2013), con impactos ambientales y socioeconómicos relevantes en el que el sistema de alerta temprana se convirtió en una prioridad para La Organización Meteorológica de la República Islámica de Irán con la ayuda de la teledetección (IRIMO, 2013), mientras los planes Holísticos de adaptación sobre Vietnam promueve el apoyo técnico a partir de experiencias, tecnologías y prácticas probadas (CGIAR, 2016).

Finalmente destacan los avances en Estados Unidos en donde se identificó un ciclo bidecadal (20 años) y multidecadal (40 años) (Hayes, Knutson, & Hu, 2005). Durante 1970 el gobierno adelantó el más grande programa de mitigación en Estados Unidos, con un costo aprox. de 8 billones de dólares entre 1974 y 1977 y en 1983 también se reportó una sequía severa que afectó a 1123 condados en 22 estados. (Wilhite D. , 1990), (Wu, y otros, 2007). Tales condiciones, sumadas a las ocurridas entre 1986 y 1992 junto a 1994, 1996 y 1998 han reforzado la realidad de una nación vulnerable (Wilhite D. , 2000) y han derivado en una alianza entre el Centro Nacional de Mitigación de la Sequía de la Universidad de Nebraska, la NOAA y el depto. de agricultura (Wilhite & GWP, 2014), (Wilhite D. , 2002), en donde se encontró que la sequía extrema y severa afectó a más del 25% del país en veintisiete de los últimos cien años, es decir, sobre grandes extensiones del territorio (Wilhite D. , 2000), (Wilhite D. D., 1992), (USGS, 2005). Otros autores (Wu, y otros, 2007), (Pielke Sr, Salas, & Lukas, 2005), (Wilhite & GWP, 2014) encontraron que el SPI para el periodo entre 1998 y 2002 identificaba el desarrollo de las condiciones de sequía, destacando adicionalmente efectos e impactos como pérdidas por evaporación, mayores temperaturas y mayor demanda para riego.

3.4.9 Contexto Latinoamericano.

En América Latina, aproximadamente un 75% de las tierras secas están afectadas por algún grado de desertificación y 75% de las áreas agrícolas de la región se encuentra seriamente degradadas, lo cual significa que la fertilidad natural de los suelos agrícolas está disminuyendo (MAVDT, 2005). En Algunas subregiones de América del Sur como el nordeste brasileño y algunas áreas en Argentina, Paraguay, Bolivia y Colombia estas tendencias se manifiestan con mayor fuerza (UNCCD, 2011). Algunos eventos climáticos como “El Niño” y eventos extremos como los huracanes en los países de la región Caribe han intensificado estos procesos (MAVDT, 2005). Perú ocupa el tercer lugar, después de Argentina y Brasil, entre los países con mayor extensión de tierras secas en América del Sur (MINAM, Ministerio del Ambiente, Perú, 2016).

La ocurrencia de eventos climáticos extremos, tales como sequía, inundaciones y temperaturas extremas se han incrementado en los últimos años (UNESCO, 2016) (EM-DAT, 2014). La Universidad de Princeton y la UNESCO desarrollaron el LAFDM (Latin American and Caribbean Flood and Drought Monitor por sus siglas), con información útil de registros históricos y de pronóstico (UNESCO, 2014) mientras que el MWAR-LAC proporciona herramientas útiles que buscan incrementar la gobernanza del agua, incluir información climática en la gestión hídrica y brindar soporte para el uso de modernas técnicas y metodologías. Se han desarrollado observatorios nacionales de sequía en Chile, Perú, Uruguay y Honduras y a escala regional, el Monitor de Inundaciones y Sequías de América Latina y el Caribe en donde destaca la elaboración del Atlas por Sequía de la UNESCO con apoyo del IHP, CAZALAC, FUST, Euroclima, entre otros, e información para Latinoamérica y el caribe (CAZALAC, 2015), (UNESCO, 2016).

En Chile destaca el apoyo de la FAO y el IRI en el observatorio Agroclimático y se resalta la importancia de la organización y fortalecimiento de la población, mejor seguridad al abastecimiento (embalses y gestión de la demanda) y distribución y los seguros agrícolas; decisiones soportadas en análisis de series históricas (Fernandez, 1997), (Fernandez, Donoso, Luraschi, Orphanópoulos, & Salazar, 1999) y es posible concluir que en el siglo XX hubo una disminución de precipitaciones de un 30% (FAO, 2010). El Observatorio Peruano de Sequía es similar al caso de Chile y cuenta con un set de mapas y figuras que muestran condiciones actuales, proporciona información sobre frecuencia de sequías pasadas y proyecciones de condiciones en el futuro, además de

una colección dedicada observaciones, Análisis y predicciones de los eventos ENSO e impactos específicos en Perú. (UNESCO, 2016). En mayo de 2016 el Ministerio del Ambiente lanza la Estrategia Nacional de Lucha contra la Desertificación y la Sequía 2016 – 2030 (ANA, 2016). Es común que se presentan episodios importantes de sequía en el noreste semiárido de Brasil, razón por la cual el Gobierno de Brasil tuvo la necesidad de asociarse con la ONU para planificar y organizar un taller regional en América Latina buscando desarrollar las capacidades en política y gestión de sequías (Wilhite & GWP, 2014). En países como Bolivia y México las acciones se han centrado en el uso eficiente del agua, manejo adecuado de suelos, prevención y mitigación, coordinación interinstitucional, investigación dirigida, comunicación y divulgación (UNESCO, 2016), (Wilhite & GWP, 2014).

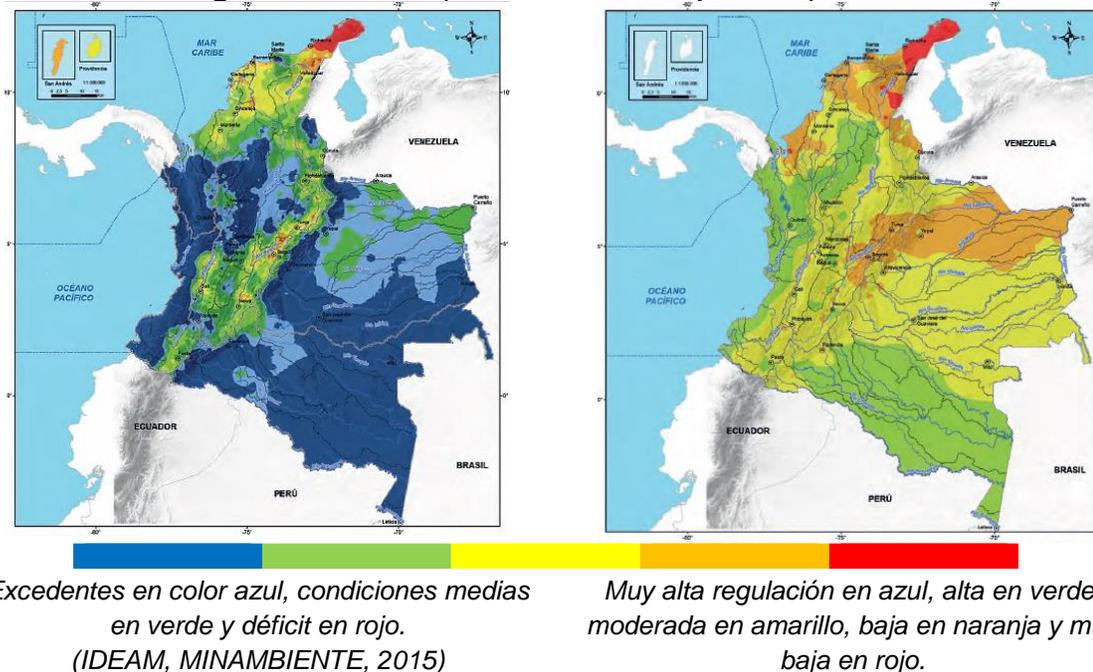
La sequía ha sido recurrente y persistente a lo largo de su historia que alteran no sólo la actividad agrícola, sino la vida misma de las comunidades con poca atención científica y política (Ortega Gaucin, 2013). En resumen los portales de monitoreo latinoamericano de relevancia e interés son el Latin American Flood and Drought Monitor, LAFDM y el The Global Drought Monitor Portal, GDMP.

3.4.10 Contexto país – Colombia

En promedio, una vez cada cinco años es posible esperar en alguna de las regiones naturales del país una sequía que cubra más del 50% del territorio (MAVDT, 2005). Múltiples estudios se han realizado en Colombia relacionados con la sequía en los que se considera la variabilidad espacial y temporal (Zuluaga L, 2009), (Gómez Serna, Ochoa, & Poveda, 2016), (IDEAM & Hurtado, 2012) y todos coinciden en la particularidad del fenómeno sobre diferentes regiones por tanto es necesario mayor detalle en nuevos estudios. A nivel institucional el pasado mes de marzo de 2015 se aprobó el Estudio Nacional del Agua ENA 2014 por sus siglas (IDEAM, MINAMBIENTE, 2015) tiene como propósito el evaluar la situación actual, estado, dinámica y tendencias del agua en Colombia y sus regiones a partir de la actualización y complemento del ENA 2010, para condiciones climáticas medias y extremas, del cual resaltan varias definiciones de interés para el presente estudio tales como oferta hídrica total superficial,

oferta hídrica disponible, caudal ambiental, Índice de aridez (IA) e índice de regulación y retención hídrica (IRH), éstos dos últimos se presentan a continuación con la Figura 33:

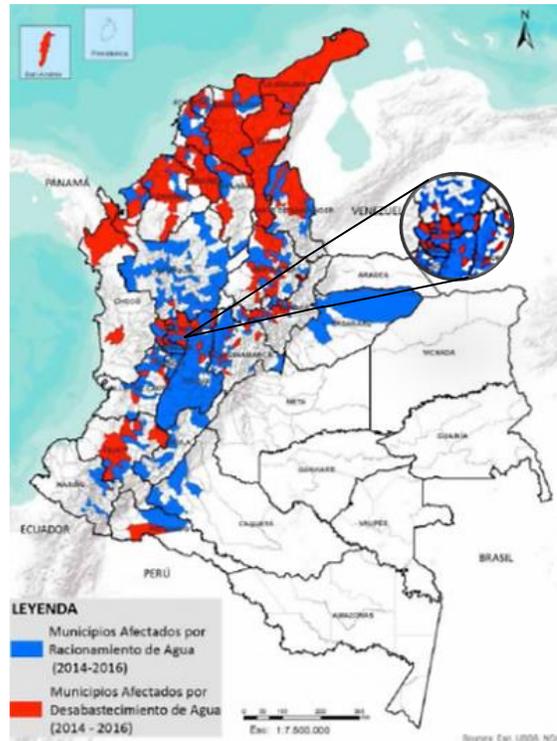
Figura 33. Comparativo entre el IA y el IRH para Colombia.



El capítulo 2.4 del ENA relacionado con las sequías plantea textualmente que “A fin de evaluar la duración e intensidad de los eventos se requiere un indicador sencillo y versátil que permita caracterizar la ocurrencia de este tipo de fenómenos en el país. Para la condiciones de Colombia se propone el uso del índice de precipitación estándar – SPI”. Los análisis históricos indican que se presentó una condición extremadamente seca para el SPI – 3 meses en los años 1977, 1979, 1985, 1992, 1995, 1998 y 2010 (IDEAM, MINAMBIENTE, 2015). Los indicadores hídricos nacionales consideran condiciones naturales o antrópicas así: Indicadores del sistema hídrico: Índice de regulación hídrica (IRH), Índice de aridez (Ia), Indicadores de intervención antrópica: Indicadores de presión por uso de agua: Índice de uso de agua (IUA), Índice de presión hídrica al ecosistema (IPHE), Índice de agua no retornada a la cuenca (IARC) y el Índice de eficiencia en uso del agua (IEUA). Indicadores de estado de calidad y presión por contaminación: Índice de calidad de agua (ICA) e Índice de alteración potencial a la calidad (IACAL). Indicador de vulnerabilidad: Índice de vulnerabilidad hídrica por desabastecimiento (IVH) e Índice de Vulnerabilidad frente a Eventos Torrenciales (IVET). (IDEAM, MINAMBIENTE, 2015).

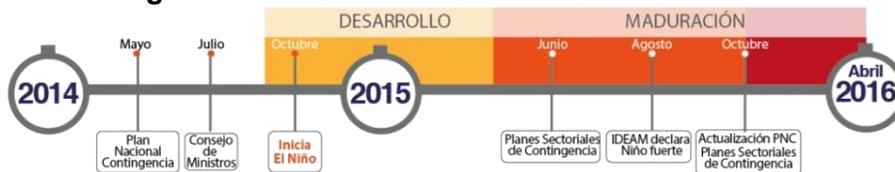
Los resultados para Caldas en general precisan vulnerabilidad Alta y Muy Alta para la cuenca del río Chinchiná (CORPOCALDAS, 2015). El IDEAM y el MAVDT presenta para el 2005 procesos de desertificación y niveles de afectación por departamentos y los resultados para Caldas indican que para el área departamental total (7.444 Km²) presenta un área con desertificación de 379 km², equivalentes al 5.1%, con el 2.9% en gravedad baja, el 1% en gravedad moderada y el 1.1% en gravedad alta (MAVDT, 2005). La Figura 34 muestra a Caldas como uno de los departamentos afectados por la sequía, y es posible identificar el desabastecimiento en la zona norte de Caldas, mientras la Figura 35 y la Figura 36 permiten identificar el rezago que se presenta entre la declaratoria de “Niño” fuerte (agosto de 2015) y el desabastecimiento por municipios.

Figura 34. Municipios afectados por desabastecimiento y racionamiento por fenómeno ENSO en su fase seca entre el 2014 y el 2016.



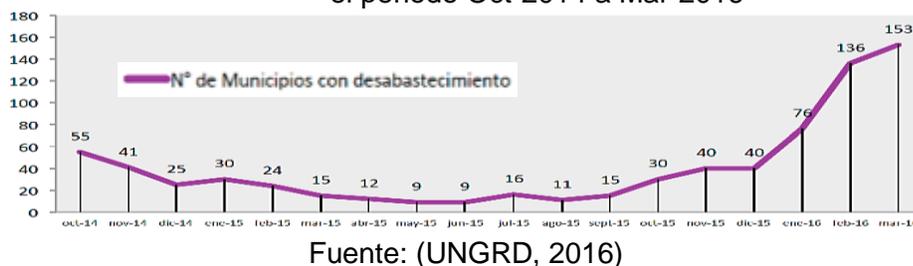
Fuente: SCR 2016 a partir datos VASB, tomado de (UNGRD, 2016)

Figura 35. Evolución El Niño 2015-2016 en Colombia.



Fuente: (CORPOCALDAS, 2016) Adaptado de la Presidencia de la República.

Figura 36. Afectación de municipios con desabastecimiento por El Niño entre el periodo Oct-2014 a Mar-2016



Colombia ha sido incluida dentro del Atlas de Sequía impulsado por diferentes instituciones como CAZALAC, UNESCO, IRI, RALCEA, ICIWARM y Euroclima (CAZALAC, 2015). Para la UNGRD y el país en relación con el abastecimiento queda la insuficiencia en el número de estaciones de monitoreo hidrológico, específicamente en las zonas de captación. De igual forma el desconocimiento de agua subterránea en municipios y la invisibilización de la misma como una fuente de abastecimiento, disminuye las oportunidades de contar con fuentes alternas, además debe aumentarse el monitoreo y protección de los pozos de agua subterránea y el conocimiento de los mismos para que la población los perciba como una fuente viable de abastecimiento (UNGRD, 2016). Cabe destacar que la Unidad Nacional de Gestión del Riesgo y Desastres de Colombia (UNGRD, 2015) define como posibles impactos bajo un escenario de sequía, el desabastecimiento hídrico en bocatomas de acueductos.

La UNGRD expone que entre 2005 y 2015 el mayor número de eventos asociados con el recurso hídrico fueron las inundaciones (62%), seguidas de los deslizamientos (32%), la sequía (2,2%) y por último las avalanchas (1.8%). La normatividad relacionada con el Riesgo de desastres (Ley 1523 de 2012), se ha orientado a los deslizamientos, inundaciones y avenidas torrenciales, dejando a un lado la sequía. Sin embargo la Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico (PNGIRH) aborda riesgos asociados al recurso hídrico tales como el riesgo por desabastecimiento, riesgo por sequía y desertificación y riesgo por contaminación hídrica (MAVDT, 2010). Otros aportes por destacar de la PNGIRH es que el insumo fue generado por las Autoridades Ambientales de las diferentes zonas del país, se subraya la riqueza hídrica nacional pero con alta variabilidad espaciotemporal, establece los principios fundamentales y una estructura con lineamientos para la Gestión Integral del Recurso Hídrico que se presenta a continuación (Figura 37):



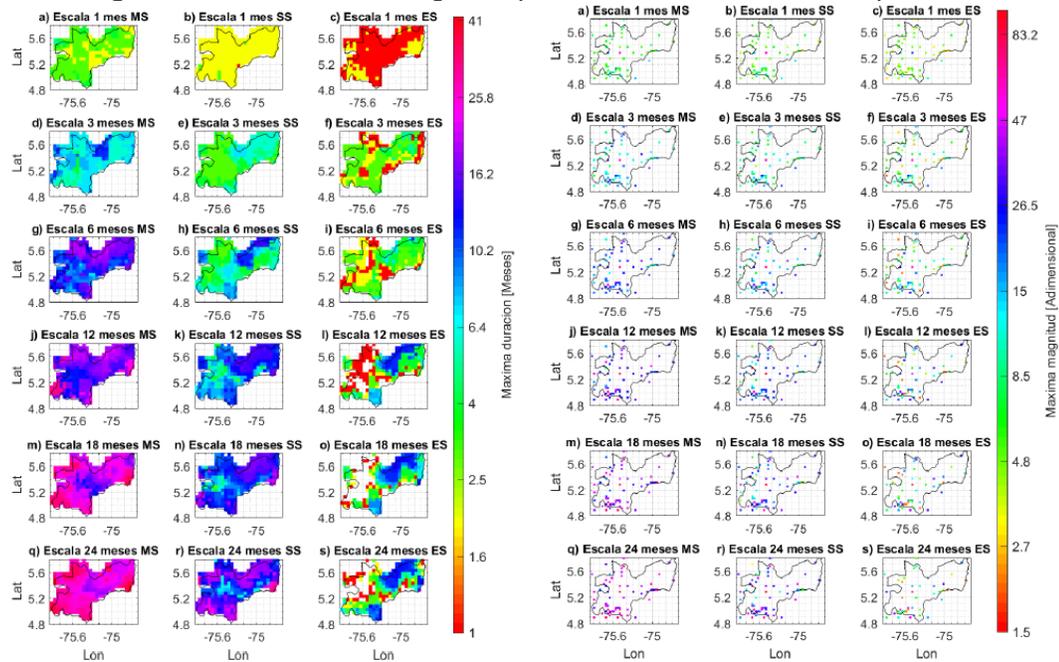
Fuente: (MAVDT, 2010) (IDEAM, MINAMBIENTE, 2015)

El presente análisis está alineado con las siguientes estrategias: **Oferta:** Ampliar el conocimiento de oferta hídrica. Generar insumos asociados a los servicios ecosistémicos de regulación hídrica. **Demanda:** Estimar la demanda mínima para el abastecimiento de acueductos, aplicando el balance oferta-demanda y su relación con el caudal ambiental. **Riesgo:** Generar conocimiento y llevarlo a un lenguaje común. También busca que los entes territoriales articulen la información generada en su gestión. **Fortalecimiento Institucional:** Se logra poner a disposición herramientas y metodologías de análisis para una mejor gestión pública a través de procesos de formación e investigación. **Gobernabilidad:** La apropiación del conocimiento tiene como fin disminuir el temor frente a fenómenos naturales, entendiendo los componentes y procesos hídricos para la transformación de conflictos.

3.4.11 Contexto regional – Departamento de Caldas

Estudios como la cuantificación de caudales en las fuentes hídricas superficiales de Caldas (CORPOCALDAS, 2010) utilizaron el método estadístico de regionalización de caudales para obtener caudales medios y mínimos. Recientemente se ha realizado la estimación del SPI para el departamento de Caldas con el propósito de la incorporación del cambio climático en el ordenamiento de cuencas y planes de manejo (CORPOCALDAS; GOTTA Ingeniería, 2017) (Figura 38).

Figura 38. Máxima magnitud para diferentes escalas temporales del SPI.



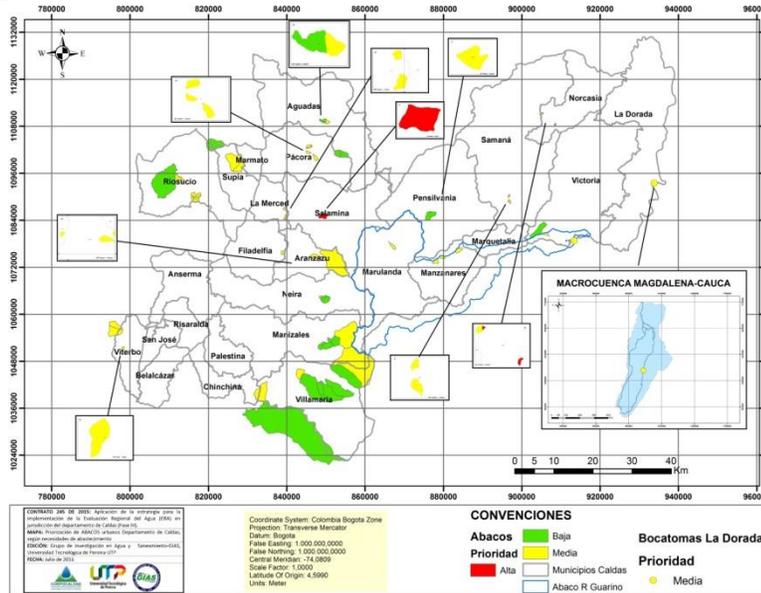
Base de Datos CHIRPS y Estaciones.

Fuente: (CORPOCALDAS; GOTTA Ingeniería, 2017).

El SPI ha sido propuesto en 2014 como uno de los indicadores de la línea base para Caldas en términos de sequía. La cuenca del río Chinchiná ha concentrado los estudios por la importancia y la disponibilidad de información (CORPOCALDAS, 2012). Otro estudio realizado en Caldas relacionado con acueductos municipales se denomina Evaluaciones Regionales del Agua (CORPOCALDAS, 2015) y su objetivo fue identificar zonas estratégicas de abastecimiento de agua en las cabeceras urbanas del departamento de Caldas, a partir de información secundaria. Los resultados clasifican las áreas abastecedoras de acueductos municipales (ábacos) a través del Índice de Vulnerabilidad Hídrica IVH en categorías Alta y Muy alta, razón por la cual fue necesario definir nuevos criterios de priorización con una ponderación asignada en mesa de expertos así: IVH (10%), Nivel de complejidad (15%), pérdidas totales (15%), orden de la corriente (20%), continuidad en el servicio de acueducto (10%), condiciones de abastecimiento (10%) y predominio de usos del suelo y coberturas vegetales (20%). Destacan los acueductos municipales de Salamina, Norcasia y La Merced, en donde se presentaron problemas durante la sequía por “El Niño” 2015-2016, en especial Salamina y La Merced (CORPOCALDAS, 2016). Los ábacos de menor prioridad fueron las áreas abastecedoras de los acueductos de Manizales, Chinchiná-Palestina, Neira, Regional de

Occidente y Aguadas; en algunos casos obedeció a conflictos por uso del agua. Los resultados a partir de la priorización se muestran a continuación (Figura 39):

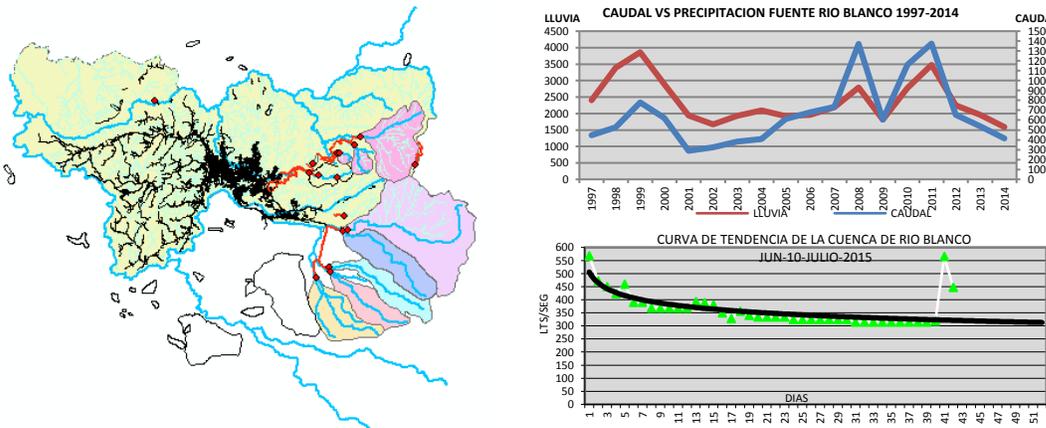
Figura 39. Acueductos con problemas de abastecimiento en Caldas.



Fuente: (CORPOCALDAS, 2016)

La empresa Aguas de Manizales, abastecedora de la cabecera urbana de la capital Caldense ha realizado un monitoreo permanente de sus fuentes hídricas. Es quien más se ha interesado en identificar plenamente la oferta hídrica y cuenta con un monitoreo histórico de caudales y de recesión en épocas de estiaje que se muestra en la Figura 40.

Figura 40. Análisis histórico de caudales y recesión – Aguas de Manizales.



Fuente: (AGUAS DE MANIZALES, 2016)

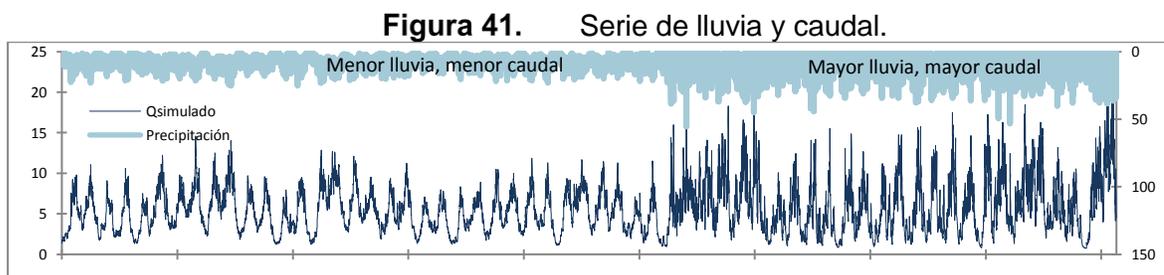
La tercera comunicación de cambio climático (IDEAM, PNUD, MADS, DNP, CANCELLERIA, 2015) generó además del análisis nacional, análisis regionales y una serie de fichas departamentales, entre ellos Caldas el cual plantea para el horizonte 2071-2100, lo siguiente (IDEAM, PNUD, MADS, DNP, CANCELLERIA, 2015):

- La temperatura del Departamento podrá aumentar en 2,4°C en promedio. Los principales aumentos se podrán generar en los municipios de Samaná, Marquetalia, Norcasia, Victoria y La Dorada en donde la temperatura podrá aumentar en 2,5°C.
- El Departamento tendrá aumentos de precipitación de entre un 20% en 2040 y hasta un 28% para fin de siglo. Las regiones Centro-sur, Bajo Occidente y Alto Occidente, serán aquellas en donde la precipitación podrá aumentar hasta en 30%.

De otro lado, el plan de acción nacional – lucha contra la desertificación y la sequía en Colombia define a escala municipal que los municipios con mayor área desertificada son Aguadas y La Dorada (MAVDT, 2005). El Niño del periodo 1997-1998 dejó como resultado para Caldas, un área con déficit moderado del 43%, normal o ligeramente deficitario del 33%, excedente con afectación del 16% y un porcentaje con servicios inadecuados del 4% (IDEAM, 1997).

3.5 Modelación hidrológica

La modelación hidrológica busca representar los procesos físicos del ciclo del agua. Ante la ausencia de registros de caudal para corrientes en toda la extensión del territorio, una herramienta práctica es la modelación a partir de caudales de estaciones existentes que son usadas como referencia. Generalmente relaciona variables denominados input o entradas y, a través de diferentes procedimientos técnicos, arroja como resultado lo que conocemos como outputs o salidas. La Figura 41 muestra la entrada y salida más importante, así como la respuesta del modelo traducida en caudales (considerando diferentes procesos hidrológicos) ante la presencia de lluvia.

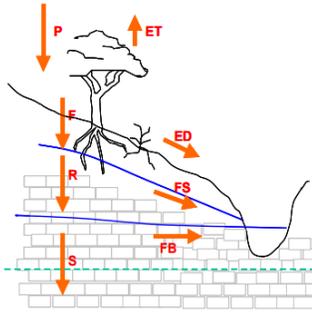


Fuente: Propia.

3.5.1 Tipos de modelos

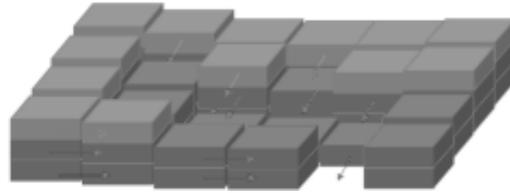
Existen diferentes tipos de modelos y sus características se describen a continuación (Figura 42, Figura 43, Figura 44 y Figura 45):

Figura 42. Modelos agregados.



Representan el ponderado de las características físicas en el área de interés. Su bondad radica en que requiere poca información y es un modelo práctico. Los modelos más conocidos son HBV, Témez, Abcd, T, P, SHIA, ARMA entre otros.

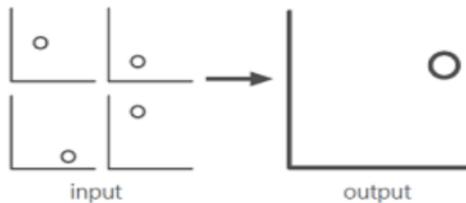
Figura 43. Modelos distribuidos.



Representan las características físicas particulares sobre cada celda de manera independiente en la extensión del área de interés dividida. La bondad es que refleja la variabilidad espacial del territorio y requiere información considerable. Los modelos más conocidos son PCR-GLOBWB, DHSVM, HL-RDHM y TETIS.

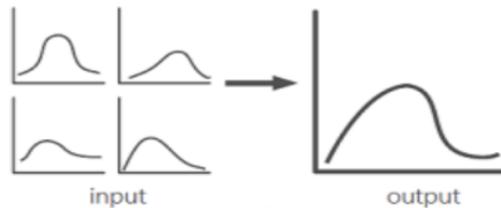
Fuente: (IDEAM, 2009).

Figura 44. Modelos determinísticos.



Tiene asociado como resultado, valores numéricos únicos asociados a un determinado proceso. La bondad es que se pueden representar fenómenos de manera precisa en la medida que el proceso esté plenamente identificado.

Figura 45. Modelos estocásticos.

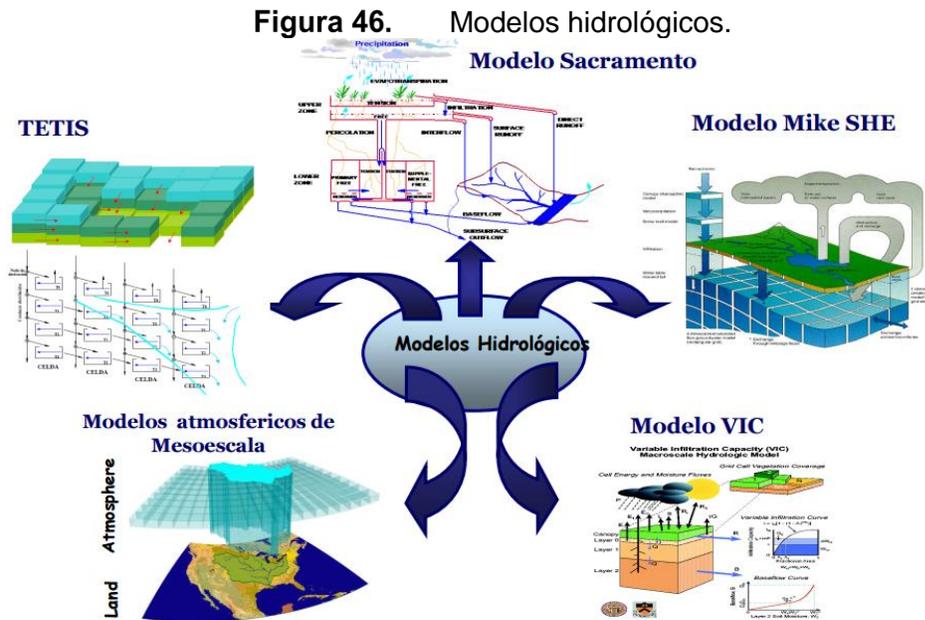


Tiene asociado como resultado, una serie de variables en función de la probabilidad. La bondad es que permite representar un fenómeno complejo, tales como los fenómenos naturales, relacionado con una ocurrencia.

Fuente: Microsoft, 2017.

En general, los modelos que parten de las teorías básicas naturales, que buscan representar matemáticamente un proceso, reciben el nombre de conceptuales o físicamente basados mientras que los que se fundamentan en resultados de laboratorio, monitoreo y de la observación, reciben el nombre de empíricos. El proceso metodológico de la modelación busca ser cíclico para retroalimentar los resultados consiste en calibrar, validar y simular; a partir del análisis y discusión de resultados, vuelve e inicia el proceso (Marulanda A, Fonseca T, Vélez U, & Cardona A, 2016).

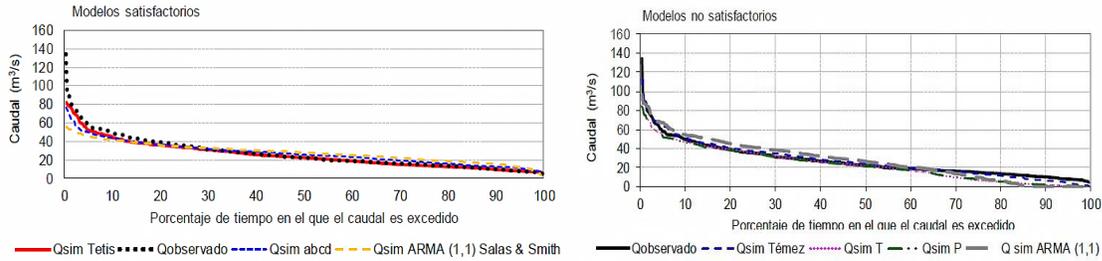
Existen los modelos semidistribuidos que buscan determinar condiciones similares en un área definiendo regiones homogéneas. Algunos de los modelos mundialmente conocidos son Sacramento, GSSHA, MIKE SHE, WEAP, HEC-HMS, VIC, RS MINERVE, entre otros. A continuación con la Figura 46 muestra el funcionamiento de ellos:



Fuente: (IDEAM, 2009).

La complejidad de los modelos varía de acuerdo a los objetivos y aplicaciones (Smakhtin & Sood, 2015). Diferentes modelos han sido usados en la región (Tetis, Témez, Abcd, T, P y ARMA - Figura 47) sin embargo los indicadores estadísticos fueron catalogados como buenos para Tetis y satisfactorios para abcd y ARMA (1,1) Salas & Smith motivo que reduce la incertidumbre del modelo usado (Ocampo & Vélez, 2013). Los resultados del estudio demostraron pueden facilitar una mejor comprensión del modelo, garantizando el sentido físico e hidrológico de los resultados obtenidos.

Figura 47. Modelos utilizados en la cuenca del río Chinchiná, Caldas.

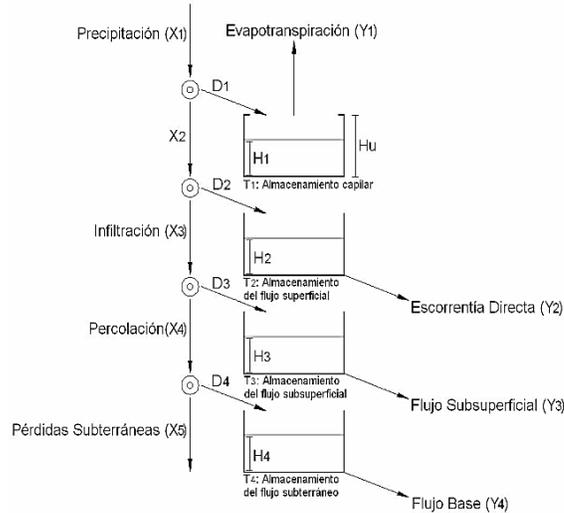


Fuente: (Ocampo & Vélez, 2013)

▪ **Modelo de tanques SHIA.**

Es un modelo conceptual agregado que representa el ciclo hidrológico a través de cuatro tanques (Vélez, 2001). Éste modelo de lluvia – escorrentía ha sido utilizado en diferentes áreas por la Universidad Nacional de Colombia en Medellín (Amaya, Restrepo Tamayo, Vélez, Vélez, & Álvarez, 2009) y Manizales (Ocampo & Vélez, 2013) (Figura 48).

Figura 48. Esquema conceptual del modelo de tanques.



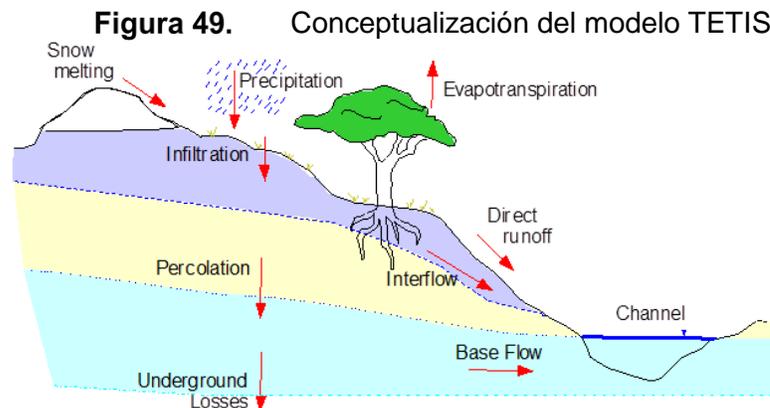
Fuente: (Vélez, 2001), (Amaya, Restrepo Tamayo, Vélez, Vélez, & Álvarez, 2009)

El modelo representa por medio de un sistema de tanques interconectados entre sí, los procesos determinantes de la producción de escorrentía: interceptación de las plantas, detención de agua en los charcos, infiltración, evapotranspiración, recarga del acuífero y escorrentía superficial, subsuperficial y flujo base, realizando el balance de agua en cada tanque, actualizando los volúmenes de agua almacenados (Amaya, Restrepo Tamayo, Vélez, Vélez, & Álvarez, 2009). El modelo de Tanques SHIA demostró representar de manera aceptable las series de caudal de diferentes estaciones con alto grado de

representatividad entre varias cuencas en Colombia. El mayor grado de incertidumbre se asocia con la precipitación debido al escaso número de estaciones en la extensión del territorio Colombiano en general (Amaya, Restrepo Tamayo, Vélez, Vélez, & Álvarez, 2009). **Bondades:** Es un ejercicio simplificado que permite representar caudales a cualquier escala temporal sin requerir demasiada información espacial. **Debilidades:** No es posible determinar la variación espacial de los diferentes componentes físicos.

▪ Modelo TETIS.

El modelo Tetis es un modelo distribuido que consiste en cinco tanques correspondientes al almacenamiento estático del que depende la evapotranspiración, almacenamiento superficial del que depende la escorrentía, almacenamiento gravitacional del que depende la percolación y el flujo subsuperficial y el acuífero del que dependen las pérdidas del sistema y el flujo base (Francés, Vélez U, & Vélez U, 2007) (Figura 49).



Fuente: (Francés, Vélez U, & Vélez U, 2007).

El modelo TETIS es un modelo hidrológico desarrollado por el grupo de investigación conformado por Ignacio Vélez Upegui, Julián Vélez Upegui y Marino Puricelli y liderado por Félix Francés García desde la Universidad Politécnica de Valencia. En su base teórica se emplea la “onda cinemática”, que es una simplificación de las ecuaciones de Saint Venant al despreciar en la ecuación de conservación de energía los términos correspondientes a los efectos inerciales y de presión. **Bondades:** Representa muy bien la variabilidad espacial de los componentes físicos de la zona aferente. **Debilidades:** Requiere bastante información relacionada con coberturas vegetales, suelos, geología, capacidades de almacenamiento, infiltración, percolación y conductividad hidráulica.

3.5.2 Modelación de caudales para extremos mínimos

Tienen como objeto la aplicación directa en los estudios de prefactibilidad de obras civiles tales como acueductos y sistemas de riego entre otros (Poveda J, y otros, 2002). Éstos estudios suelen tener como fundamento la regionalización de caudales a partir del análisis de frecuencias y formas del hidrograma, siendo las más comunes las de tipo exponencial (Smakhtin V. U., 2001). Si bien existe una alta linealidad entre caudales mínimos y el área aferente al punto de interés, así como una fuerte correspondencia entre el caudal mínimo y la componente climática, trabajan a partir de parámetros estadísticos de caudales conocidos (la media $\mu_{Q_{min}} = c_{\mu} Q_{med}$ y la desviación estándar $\sigma_{Q_{min}} = c_{\sigma} Q_{med}$, donde c es una constante.), ofreciendo como limitante la poca representación de condiciones físicas particulares de regiones que difieran a las adoptadas como referencia. Algunos estudios adelantados tienen especiales consideraciones para sequía bien sea bajo criterios de regionalización o curvas de recesión-abatimiento (Poveda J, y otros, 2002); análisis que permiten intuir los aspectos básicos de la hidrología en escenarios de estiaje. La recesión involucra parámetros que tienen relación con el suelo en los estimativos de caudales que no son tenidos en cuenta al aplicar otras metodologías (Poveda J, y otros, 2002). Para tal fin se ha establecido la ecuación exponencial $Q(t) = Q_0 e^{(-\alpha t)}$ (OMM, 1994) en donde Q_0 representa un caudal dado por las condiciones iniciales, medias o de referencia, t representa el tiempo en días, e es la base de los logaritmos naturales (igual a 2.7182) y α representa una constante característica de la cuenca y se han estimado valores para diferentes zonas hidrográficas en Colombia (Poveda J, y otros, 2002) La Tabla 11 muestra algunos resultados:

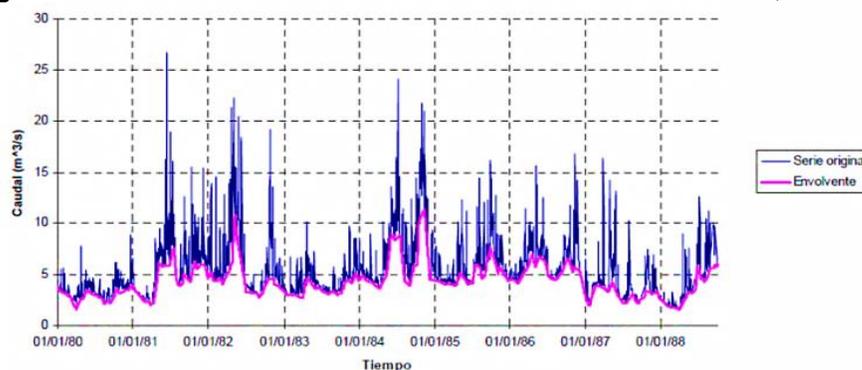
Tabla 11. Parámetros de recesión para diferentes regiones.

REGIÓN	t media (días)	Varianza de t (días) ²	k (días) ⁻¹	Pendiente de $q_0/Q_{med} = f(t)$	Constante de $q_0/Q_{med} = f(t)$
Sogamoso	107	3920	0.021	1.075	0.739
Atrato	78	1860	0.014	0.553	0.447
Valle del Cauca	137	4720	0.009	0.937	0.413
Cañón del Cauca	117	2720	0.011	0.969	0.267
Nechí	126	1320	0.010	1.188	0.466
Magdalena Medio	106	2080	0.014	0.779	0.450
Alto Magdalena	87	2170	0.008	0.655	0.480
Catatumbo	136	5600	0.010	0.978	0.740

Fuente: (Poveda J, y otros, 2002).

Adicionalmente el método de recesión suele ser complementado con el método de la envolvente mínima de caudales que busca aislar el efecto de la lluvia en épocas de sequía (AMVA, 2003) (ver Figura 50), puesto que sobre los eventos de sequía se pueden presentar lluvias aisladas que alteran la recesión.

Figura 50. Envolvente mínima de caudales – Río Medellín, $t = 10$ días.



Fuente: (AMVA, 2003).

Para el departamento de Caldas, la Autoridad Ambiental cuenta con una estimación de caudales medios y mínimos mensuales que establece un escurrimiento general bajo criterios estadísticos de regionalización (Gonzalez L, 2010), (CORPOCALDAS, 2010) que en algunos casos no representa la realidad de acuerdo a los aforos realizados por diferentes funcionarios. Por otra parte se cuenta con información a partir de diferentes POMCAs (CORPOCALDAS, 2012). Por último un análisis de sensibilidad busca entender la respuesta del modelo ante cambios de parámetros, de esta forma se establece cuáles parámetros son más relevantes y en cierta forma se puede establecer la incertidumbre asociada (Marulanda A, Fonseca T, Vélez U, & Cardona A, 2016).

3.6 Referente normativo

Colombia ha tenido un amplio referente normativo y a continuación se describe el marco normativo en el cual se cimenta el presente estudio:

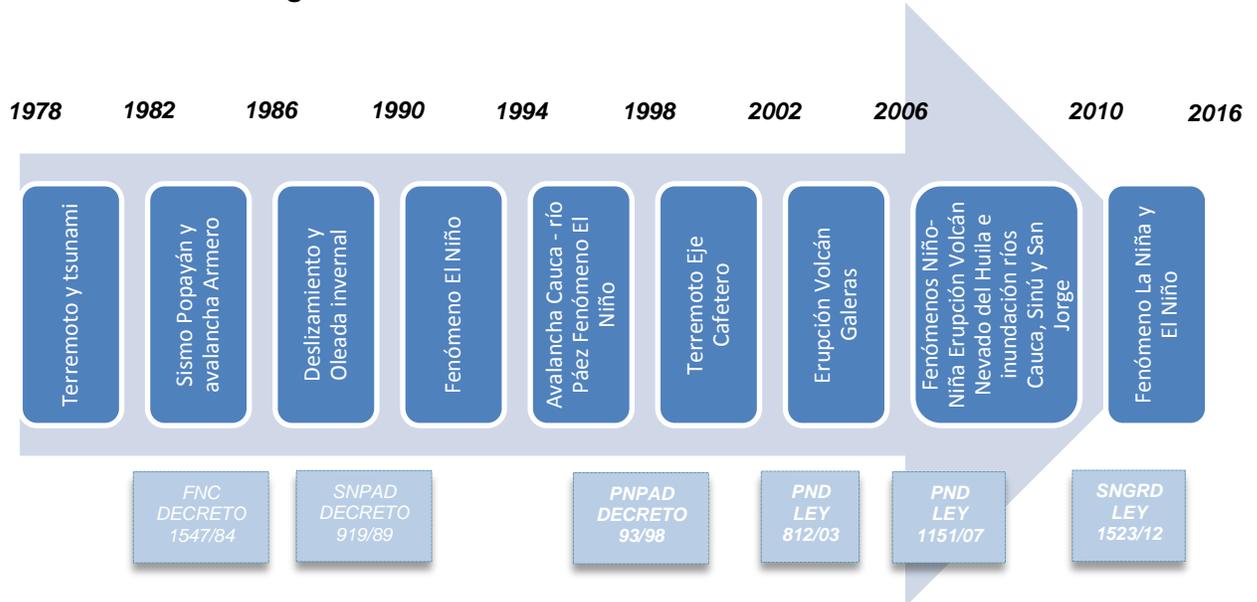
- Decreto 1381 de 1940: Ministerio de Economía Nacional relacionado con el aprovechamiento, conservación y distribución de aguas de uso público.
- Decreto 2811 de 1974: Se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente.
- Decreto 1541 de 1978: por el cual se reglamenta la Parte III del Libro II del Decreto-Ley 2811 de 1974 y parcialmente la Ley 23 de 1973.

-
- Ley 99 de 1993: por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA, y se dictan otras disposiciones.
 - Ley 388 de 1997: Se crea el Sistema Nacional Ambiental.
 - Ley 373 de 1997: Programa para el uso eficiente y ahorro del agua.
 - Resolución 865 de 2004: Por la cual se adopta la metodología para el cálculo del índice de escasez para aguas superficiales a que se refiere el Decreto 155 de 2004 y se adoptan otras disposiciones.
 - Decreto 1323 de 2007: Sistema de Información del Recurso Hídrico –SIRH.
 - Decreto 1324 de 2007: Por el cual se crea el Registro de Usuarios del Recurso Hídrico y se dictan otras disposiciones.
 - Decreto 3930 de 2010: Por medio del cual se definen los usos del agua, los residuos líquidos y se dictan otras disposiciones.
 - Decreto 303 de 2012: Por el cual se reglamenta parcialmente el artículo 64 del Decreto-ley 2811 de 1974 en relación con el Registro de Usuarios del Recurso Hídrico y se dictan otras disposiciones.
 - Decreto 1640 de 2012: Por medio del cual se reglamentan los instrumentos de planificación, ordenación y manejo de las cuencas hidrográficas y acuíferos.
 - Ley 1523 de 2012: Por la cual se adopta la política nacional de gestión del riesgo de desastres y se establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres y se dictan otras disposiciones.
 - Decreto 1076 de 2015: Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible.
 - Decreto 1077 de 2015: Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Vivienda, Ciudad y Territorio.
 - PNGIRH: Garantizar la sostenibilidad del recurso hídrico, mediante la gestión y el uso eficiente y eficaz, articulados al ordenamiento y uso del territorio y a la conservación de los ecosistemas que regulan la oferta hídrica, considerando el agua como factor de desarrollo económico y de bienestar social, implementando procesos de participación equitativa e incluyente.
 - PHN: La Fase II (2014-2018), incluye los programas, proyectos y actividades que desarrollan la Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico.

- Plan Nacional de Desarrollo – PND 2014-2018, Ley 1753 de 2014: En las líneas Desarrollo Sostenible, Ordenamiento Integral del Territorio, Calidad Ambiental Sectorial y la Política Integral de Cambio Climático.
- Plan de Acción Autoridad Ambiental de Caldas CORPOCALDAS periodo 2016-2019 en su línea estratégica a) Gestión Ambiental del Patrimonio Hídrico.

El marco normativo definido desde el MAVDT establece instrumentos de planificación a nivel de cuenca o de calidad, instrumentos de regulación y control. Su evolución se presenta en la Figura 51:

Figura 51. Evolución normativa de la GRD en Colombia



Fuente: (UNGRD, 2016)

Bajo el escenario de desabastecimiento en Caldas, las recomendaciones se orientaron a implementar los planes y programas de uso eficiente y ahorro de agua (PUEAAs – ley 373 de 1997) así como los planes de emergencia y contingencia (Res. N° 0154 de 2014), y acatar lo reportado en la resolución 463 de septiembre 15 de 2015, por medio de la cual se adoptan medidas en la administración de los recursos naturales como consecuencia de “El Niño” y se toman otras determinaciones (CORPOCALDAS, 2016):

- Medidas y acciones para la reducción del riesgo por desabastecimiento de agua.
- Para las actividades domésticas, para el sector agropecuario, y para el sector energético.

4 Metodología

La metodología utilizada busca cumplir con los tres objetivos específicos planteados, que buscan estimar la amenaza por déficit hídrico a partir de la caracterización climática y la modelación hidrológica, cuyos resultados permiten hacer un análisis del régimen hídrico en función del abastecimiento. La modelación hidrológica comprende tres fases; una primera con la información climática histórica, una segunda con información climática que simule un escenario futuro y una tercera que determine la sensibilidad del modelo referente a algunas variables objeto de gestión. La estimación de la amenaza por déficit hídrico para cada acueducto comprende el análisis del régimen de la oferta hídrica frente a la demanda, la descripción del comportamiento de la curva de recesión, el análisis probabilístico de caudales mínimos y la caracterización de la sequía meteorológica por medio del SPEI con un enfoque de SAT, metodología que se resumen en la Figura 52.

Figura 52. Esquema de la metodología planteada para estimar la amenaza por déficit hídrico



A continuación se presenta una descripción con mayor detalle en función de los objetivos específicos:

4.1 Estimación del déficit hídrico bajo condiciones de variabilidad climática

El instrumento fundamental propuesto es el modelo hidrológico, el cual utiliza la información climática previamente validada. Para ello es necesario realizar la consulta de la información disponible que permita definir la ventana temporal que ofrezca la mayor robustez posible y con la ayuda de los polígonos de Thiessen, se busca establecer la participación de cada estación que represente la variación de las condiciones climáticas. En seguida se hace necesario establecer las condiciones espaciales tales como el área aferente, así como las condiciones geomorfológicas y fisiográficas que permitan identificar la respuesta hidrológica.

Posteriormente el modelo debe ser calibrado y validado para realizar las estimaciones y simulaciones correspondientes a la estimación de la amenaza por déficit hídrico sobre las áreas abastecedoras de los acueductos, estableciendo las condiciones de abastecimiento en términos del régimen hídrico a diferentes escalas temporales frente a la demanda, recesión o abatimiento hídrico entre caudales medio y mínimo, análisis probabilístico de caudales mínimos asociado a diferentes periodos de retorno y finalmente caracterización de la sequía meteorológica por medio del SPEI, con enfoque hacia un sistema de alertas tempranas.

Finalmente y con la información obtenida del modelo hidrológico, es posible obtener índices e indicadores que buscan caracterizar de manera integrada la amenaza por déficit hídrico para cada acueducto municipal, es decir, el análisis el abastecimiento para las comunidades desde múltiples fuentes hídricas.

4.2 Efectos futuros por cambio climático en la oferta hídrica

Para incorporar uno de los tantos escenarios de cambio climático, se recurre a elegir de una evaluación integral de referencia, el escenario que presente las condiciones de menor precipitación y mayor temperatura, puesto que serán las condiciones de menor

disponibilidad hídrica por reducción de lluvias y mayor evaporación relacionada con mayores temperaturas, que a su vez representa un escenario desfavorable.

El objetivo de incorporar simulaciones por cambio climático no es generar pronósticos sino evaluar la respuesta hidrológica frente a un posible escenario de la condición climática futura. Con tal información es posible realizar nuevamente la evaluación para caracterizar el déficit hídrico en función del abastecimiento de los acueductos objeto de estudio que permita comparar cuáles serán los efectos del escenario elegido frente a las condiciones actuales.

4.3 Análisis de sensibilidad para la Gestión Integral del Recurso Hídrico

El análisis de sensibilidad permite identificar los parámetros de mayor respuesta, es decir, los parámetros que tienen gran influencia en la simulación de caudales. Éste análisis inicial permite establecer en cual componente simulada por el modelo puede ser objeto de gestión, logrando ser eficientes en las posibles intervenciones que puedan sugerir el presente estudio y que permita reconocer los efectos. Inmediatamente después se realiza un análisis de las condiciones actuales en términos de coberturas vegetales y uso del suelo, lo que permite simular el cambio de coberturas vegetales y usos del suelo actuales destinados a actividades agrícolas o pecuarias, por bosques.

5 Resultados

A continuación se presentan los resultados obtenidos para cada uno de los objetivos específicos, siguiendo la metodología planteada.

5.1 Estimación del déficit hídrico a partir de modelación hidrológica

5.1.1 Recopilación, y análisis información temporal

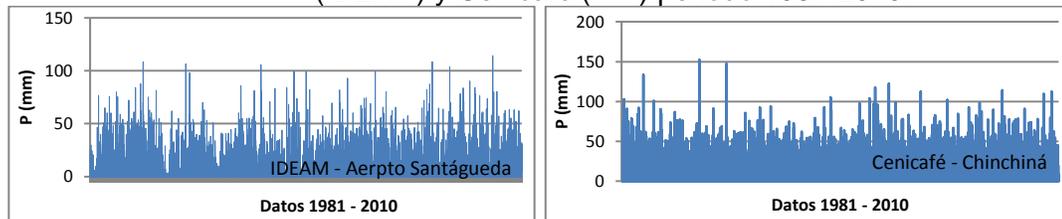
Una vez definida el área de estudio, se procedió a realizar la consulta de entidades que realizan monitoreo hidroclimatológico en la zona. Las estaciones y variables consultadas se presentan a continuación en la Tabla 12:

Tabla 12. Entidades con estaciones de precipitación.

Entidad	Estaciones precipitación	Estaciones Temperatura	Estaciones Humedad relativa	Estaciones Brillo Solar	Estaciones Caudal
IDEAM	40	11	7	5	27
Cenicafé	70	25	26	24	
Aguas de Manizales	4				8
CHEC	12				8
Gensa-Isagen	13				6
TRMM	49				
Total	188	36	33	29	49

A continuación se muestran algunos registros diarios con la Figura 53:

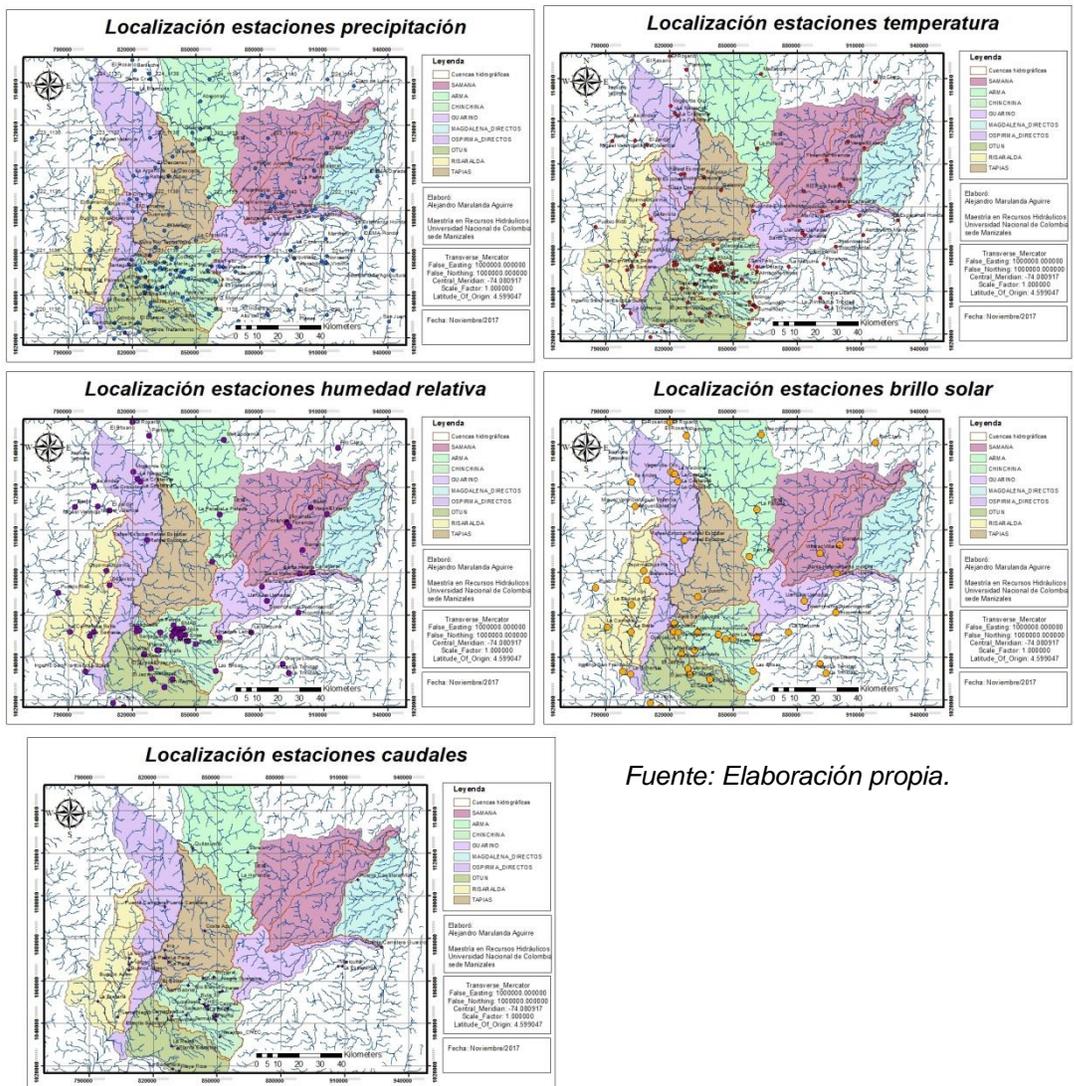
Figura 53. Series históricas precipitación estaciones aeropuerto Santágueda (IDEAM) y Cenicafé (mm) periodo 1981-2010.



Fuente: Datos IDEAM y Cenicafé, Elaboración propia.

El Anexo 0 se muestra cada una de las estaciones, ubicación y periodo de registro. El periodo de trabajo elegido a partir del mayor número de estaciones y registros es entre 1981 y 2010, además contiene lo necesario para los análisis de cambio climático y cumple con los criterios estadísticos que recomiendan una ventana temporal de 30 años o superior. La localización en términos espaciales sobre las subzonas hidrográficas de Caldas se muestra por medio de la Figura 54.

Figura 54. Mapa de estaciones para precipitación, temperatura, humedad relativa y brillo solar en Caldas.

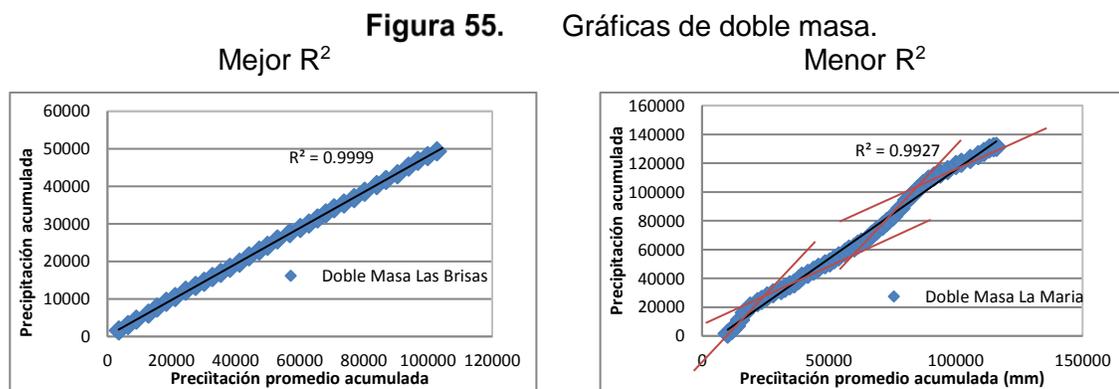


Fuente: Elaboración propia.

De otro lado los vacíos de información son completados a partir de regresiones lineales y series aleatorias que conservan el promedio y la desviación estándar reflejando el comportamiento climático de la estación más cercana (Ocampo López, 2017). Respecto

a la fuente de datos del TRMM, que consiste en información satelital a través del algoritmo 3B42-TRMM el cual reduce el error propio en mediciones a partir de radar. La descarga de la información permite establecer estaciones virtuales sobre las cuales se descarga los datos de precipitación a una escala diaria.

Para análisis hidrológicos existe un sinnúmero de metodologías para validar las series climáticas usadas. Para el presente estudio se realizaron pruebas de homogeneidad y consistencia a las series históricas buscando validar que la información utilizada ofreciera la menor incertidumbre posible. Los cambios en la pendiente de las series indican sucesos particulares de origen natural o antrópico. La Figura 55 muestra las gráficas de doble masa que permiten comparar el acumulado de una estación de referencia frente al promedio acumulado de las estaciones cercanas, así como el R^2 de cada estación.

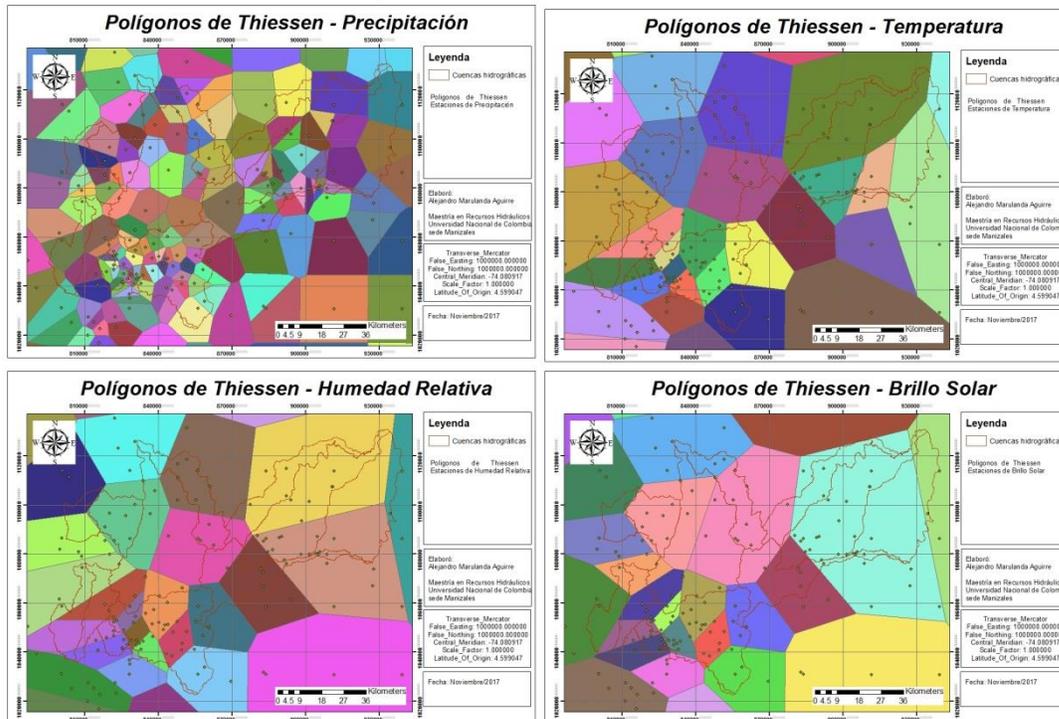


Fuente: Datos IDEAM, Elaboración propia.

Los valores del R^2 obtenidos reflejan un valor cercano a uno (1) indicando una buena relación entre los datos acumulados y la tendencia lineal. Se puede observar, incluso en las estaciones de menor valor, se obtienen valores aceptables. Cabe destacar que en la zona no se cuenta con estaciones adicionales y por tanto se considera mejor utilizarlas con las ligeras debilidades encontradas. Por fortuna los resultados obtenidos fueron consistentes y en general las pruebas realizadas garantizaron la calidad y confianza sobre la información utilizada. Posteriormente se recurre a la técnica de los polígonos de Thiessen, que permite asignar de manera aproximada, la participación espacial de las diferentes variables para cada estación, intentando representar el clima del área objeto de estudio, identificar la estación más cercana para el caso de las áreas abastecedoras en el entendido que variables como la temperatura tienen una fuerte relación con la altura

y su variación espacial registrada con la aplicación del método Inverso de la Distancia Ponderado para el caso de la precipitación. El método de Kriging supone mejores resultados para distribuciones de puntos más homogéneos y no es el caso. La Figura 56 muestra los resultados:

Figura 56. Polígonos de Thiessen para las variables precipitación, temperatura, humedad relativa y brillo solar.

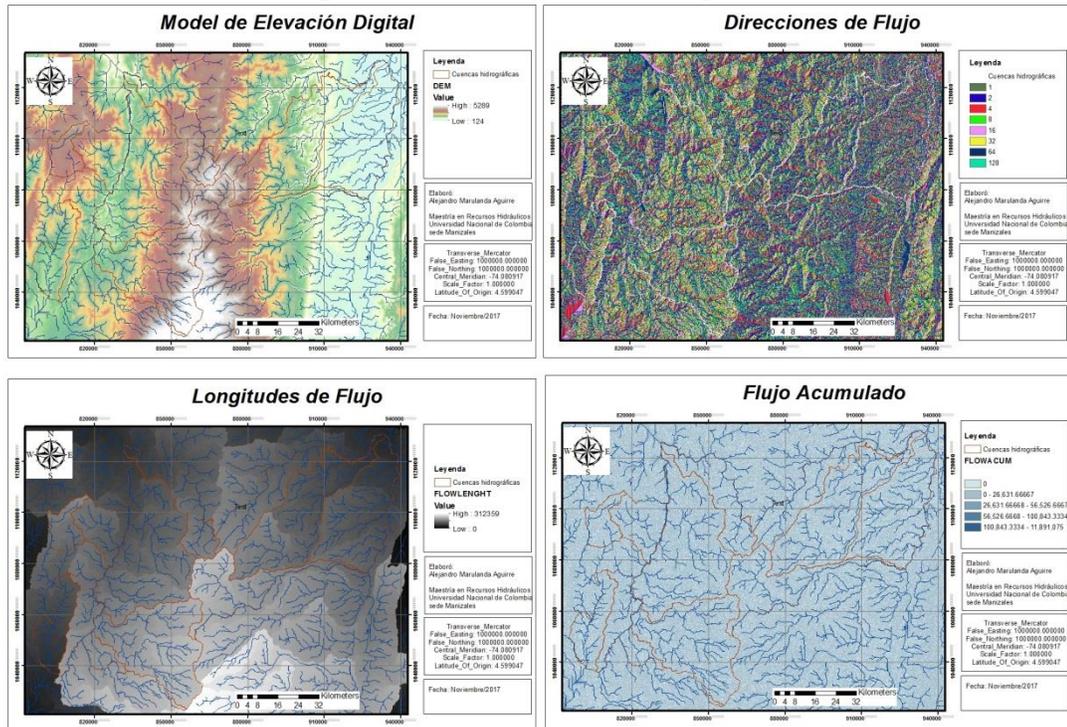


Fuente: Elaboración propia.

5.1.2 Recopilación y análisis de información espacial

Con relación a la información espacial se contó con el modelo de elevación de la Nasa con resolución de 30x30 (m) de libre acceso y descargado de la respectiva página web. De allí se deriva lo relativo a fisiografía y geomorfología relacionado también con la respuesta hidrológica complemento del clima. Una vez obtenido el modelo de elevación digital se corrigen los sumideros permitiendo obtener continuidad topográfica, se generan mapas de pendientes, direcciones de flujo, longitud de flujo y flujo acumulado para finalmente obtener, a través de la opción watershed, una delimitación de áreas aferentes de interés. La Figura 57 muestra los elementos cartográficos obtenidos:

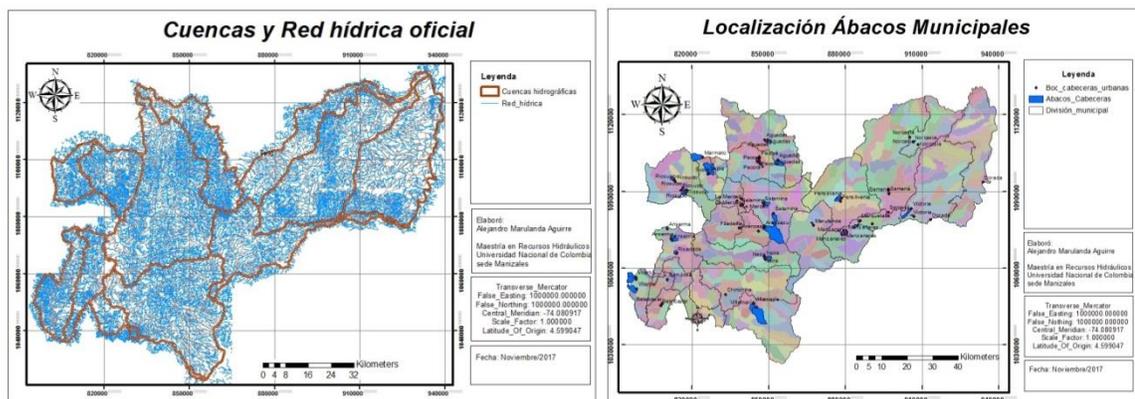
Figura 57. Elementos cartográficos base.



Fuente: Elaboración propia.

Adicionalmente se contó con la delimitación para cuencas en jurisdicción de Caldas, la red de drenaje oficial y las áreas abastecedoras de acueductos municipales (ábacos) suministrados por Corpocaldas y validados por el estudio (Figura 58).

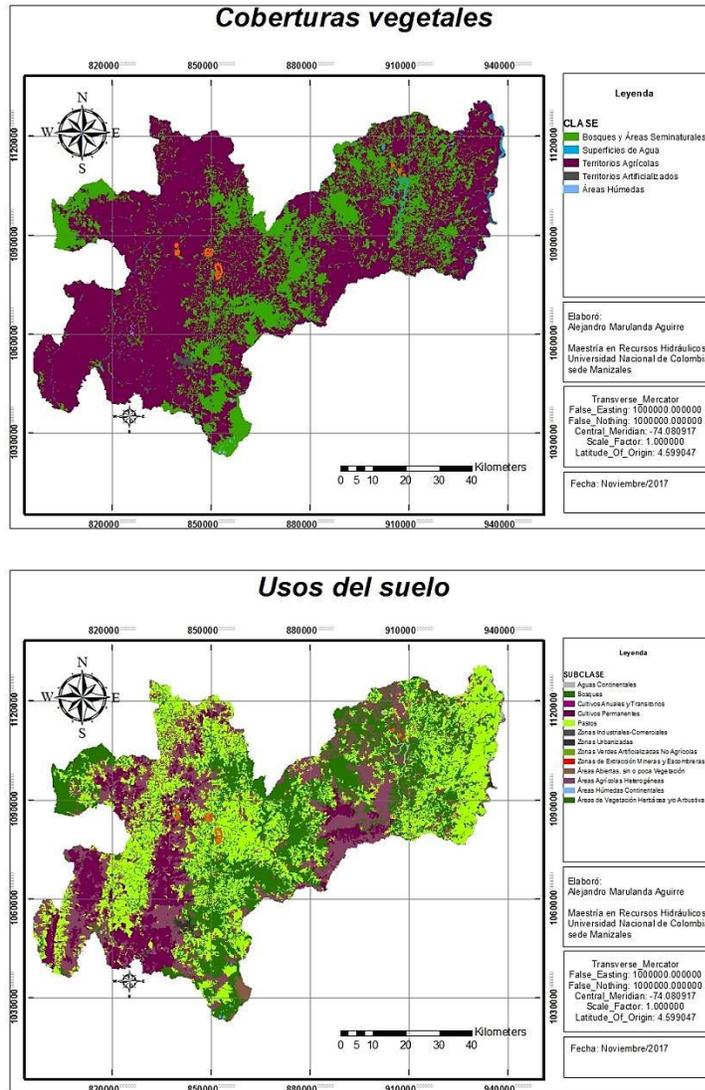
Figura 58. Cartografía oficial.



Fuente: Corpocaldas.

Para el análisis de sensibilidad se utilizaron los mapas de coberturas vegetales y usos del suelo generados por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (ver Figura 59).

Figura 59. Mapas utilizados en el análisis de sensibilidad.



Fuente: IGAC.

La caracterización fisiográfica y geomorfológica permite destacar que se presentan subcuencas de pendientes fuertes, de gran altura (La Merced y Salamina), ligeramente alargadas, tiempos de concentración homogéneos cercanos a 1 hora 10 minutos, de relieve montañoso y por tanto con potencial a eventos torrenciales. La Tabla 13 presenta los resultados de las áreas abastecedoras elegidas para el análisis de déficit hídrico:

Tabla 13. Caracterización geomorfológica y fisiográfica.

Acueducto municipal	Salamina			La Merced			Norcasia		
	Chagualito	Boquerón	El Uvito	La Isabel	El Rosario	Santana	Las Pavas	Montebello	La Virgen
Vertiente	Río Cauca	Río Cauca	Río Cauca	Río Cauca	Río Cauca	Río Cauca	Río Magdalena	Río Magdalena	Río Magdalena
Subzona hidrográfica	Tapias y otros	Tapias y otros	Tapias y otros	Tapias y otros	Tapias y otros	Tapias y otros	Río La Miel	Río La Miel	Río La Miel
Subcuenca	Pozo-Chambery - Pocito	Pozo-Chambery - Pocito	Pozo-Chambery - Pocito	Maiba-El Palo	Maiba-El Palo	Pozo-Calentaderos	Manzo-Bejuca	Manzo-Bejuca	Moro
Coordenada X (origen Bogotá)	842217	848247	851885	839558	839126	839045	905261	907349	908471
Coordenada Y (origen Bogotá)	1084217	1084075	1081382	1085344	1084339	1087086	1111076	1110000	1108066
Área [Km ²]	2.36	1.18	5.79	0.43	0.26	0.41	0.27	0.28	0.07
Perímetro (km)	6.81	4.77	12.75	2.87	2.26	2.55	2.27	2.81	1.07
Pendiente media de la cuenca (m/m)	0.40	0.44	0.40	0.47	0.51	0.42	0.31	0.27	0.22
Altura med cauce (m)	2355	2258	2344	2159	2164	2069	920	802	864
H Nacimiento (m)	2822	2653	2242	2336	2340	2269	999	892	896
H Salida (m)	2125	2094	3084	1984	1994	1876	839	722	836
Longitud del cauce principal (Km)	2346	1549	4016	742	757	705	370	853	371
Pendiente media cauce(m/m)	0.97	0.81	0.45	0.39	0.43	0.70	0.22	0.38	0.34
Pendiente máxima de la cuenca (%)	149.98	153.80	189.59	108.54	148.03	96.97	59.35	69.90	47.46
Pendiente mínima de la cuenca (%)	1.71	1.28	0.00	4.11	1.27	8.60	6.50	0.81	0.00
Coefficiente de compacidad (Kc)	1.25	1.24	1.49	1.24	1.26	1.13	1.22	1.51	1.15
Factor de forma (Kf)	0.43	0.49	0.36	0.78	0.45	0.82	2.00	0.38	0.51
Rel. elongación (Re)	0.74	0.79	0.68	1.00	0.76	1.02	1.60	0.69	0.80
Tiempo de concentración (Hrs)	1.03	0.96	1.76	1.17	1.06	1.11	1.27	1.20	1.07
Categoría IVET pendiente cuenca	3.00	3.00	3.00	3.00	4.00	3.00	2.00	2.00	2.00
Categoría IVET coeficiente compacidad	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Categoría media IVET	2.00	2.00	2.00	2.00	2.50	2.00	1.50	1.50	1.50

Fuente: Elaboración propia.

Las características morfométricas y fisiográficas permiten identificar que son corrientes de montaña, con terrenos escarpados, áreas aferentes ligeramente alargadas, moderadamente achatadas y moderadamente redondeadas en términos generales. Los tiempos de concentración cercanos a una (1) hora indican una respuesta rápida frente a eventos torrenciales y en conjunto con las categorías evaluadas por el IVET, indican finalmente una vulnerabilidad media frente a torrencialidad.

5.1.3 Modelación hidrológica: Calibración, validación y simulación

A partir de la información de caudales disponible, se delimitan las áreas aferentes y se definen las condiciones climáticas para el modelo agregado de Simulación Hidrológica Abierta SHIA (Vélez, 2001), también conocido como el modelo de Tanques, utilizado en regiones de Colombia como el río Medellín, río Chinchiná y subregiones de Risaralda. El modelo busca representar el ciclo del agua a partir de las variables climáticas precipitación, temperatura, humedad relativa y brillo solar; lo que busca es reflejar la respuesta hídrica de las condiciones físicas de la cuenca asociada.

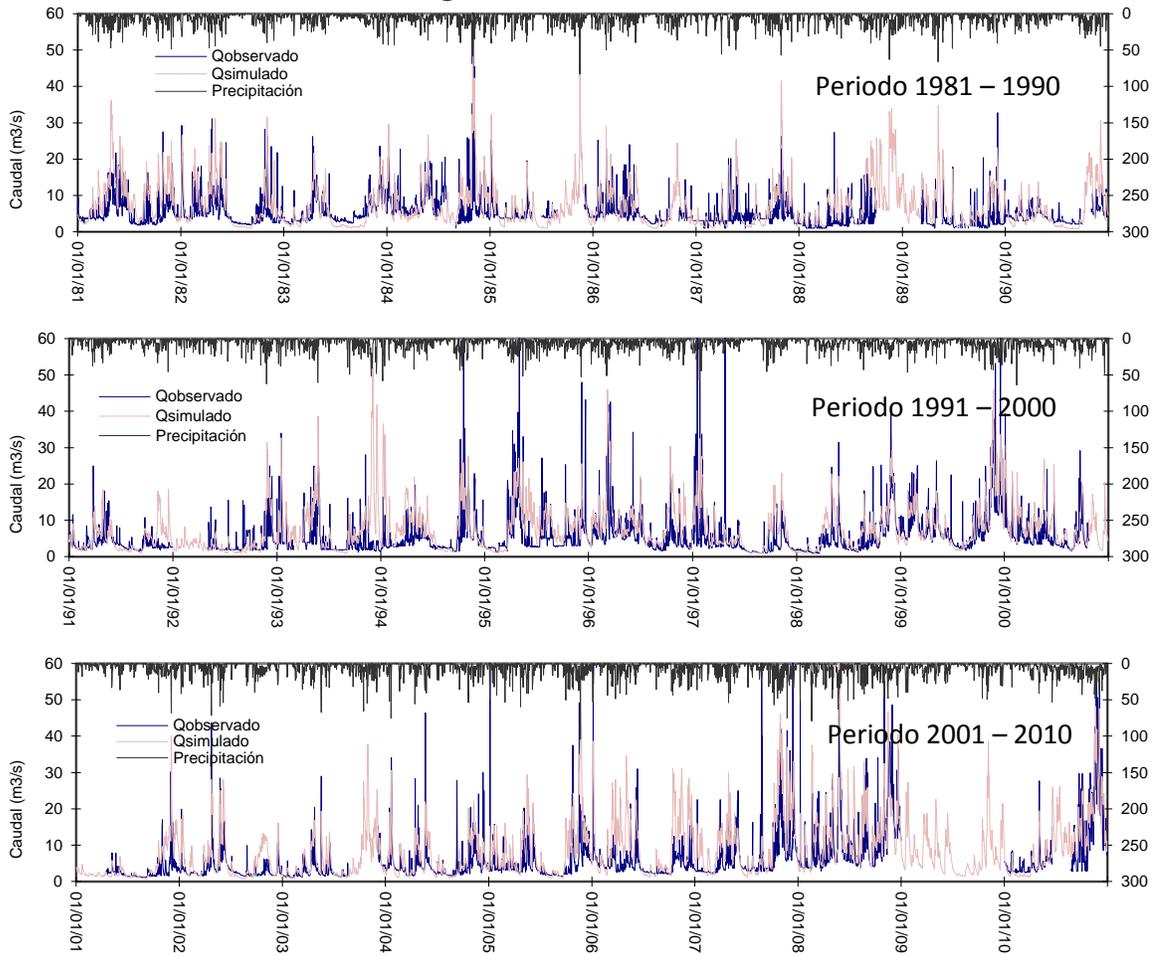
El uso en diferentes regiones ha sugerido diferentes valores para los parámetros considerados, a partir de una respuesta física de los procesos involucrados a calibrar, especialmente sobre cuencas andinas (Poveda J, y otros, 2002), (CORPOCALDAS, 2012). Particularmente en la zona se realizaron calibraciones del modelo para el río Chinchiná en el marco del POMCA; parámetros que se tomaron como referentes iniciales para el modelo por subzona hidrográfica (Tabla 14). Para la subzona hidrográfica del Tapias y Otros directos, se utilizó la información de las estaciones de Caudal Costa Azul, La Paila y Puente Juntas así como para la subzona hidrográfica de La Miel se utilizó la estación puente Carretera, todas a cargo del IDEAM. La validación comprendió otras subzonas hidrográficas diferente a las de interés tales como Arma y Guarinó.

Se presenta la calibración y validación visual, con especial énfasis en los momentos de recesión, caudales mínimos y caudales medios; los parámetros estadísticos usados normalmente en los procesos de calibración y finalmente el comparativo de las curvas de duración de caudales observados y simulados. Los resultados del proceso de calibración y validación tanto espacial como temporal de algunas estaciones se presentan a continuación (Figura 60, Figura 61, Figura 62, Figura 63, Figura 64 y Figura 65):

Tabla 14. Parámetros de calibración.

Componente	Valor	Componente	Valor
Almacenamiento Máximo Capilar	350,16	Almacenamiento Agua Superficial	0
Conductividad Capa Sup (mm/día)	5,3	Exponente Infiltración	2
Tiempo de Residencia Flujo Superficial (días)	3,79	Exponente Evaporación	0,501
Almacenamiento Capilar	257		

Figura 60. Estación La Paila.



Parámetros estadísticos de calibración:

Q Med Simulado	7,788	MAE	RSME	NASH	RSR
Q Med Real	5,509	4,26	2,06	-0,29	1,14

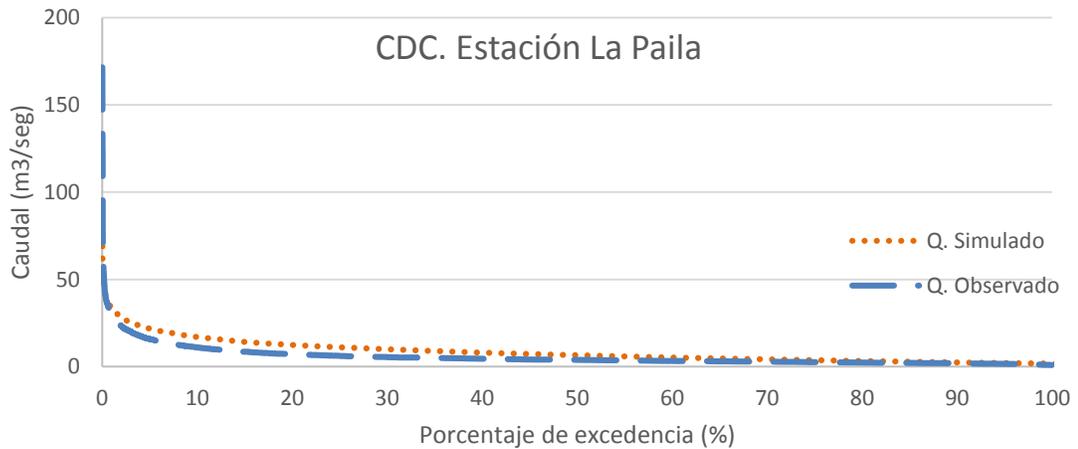
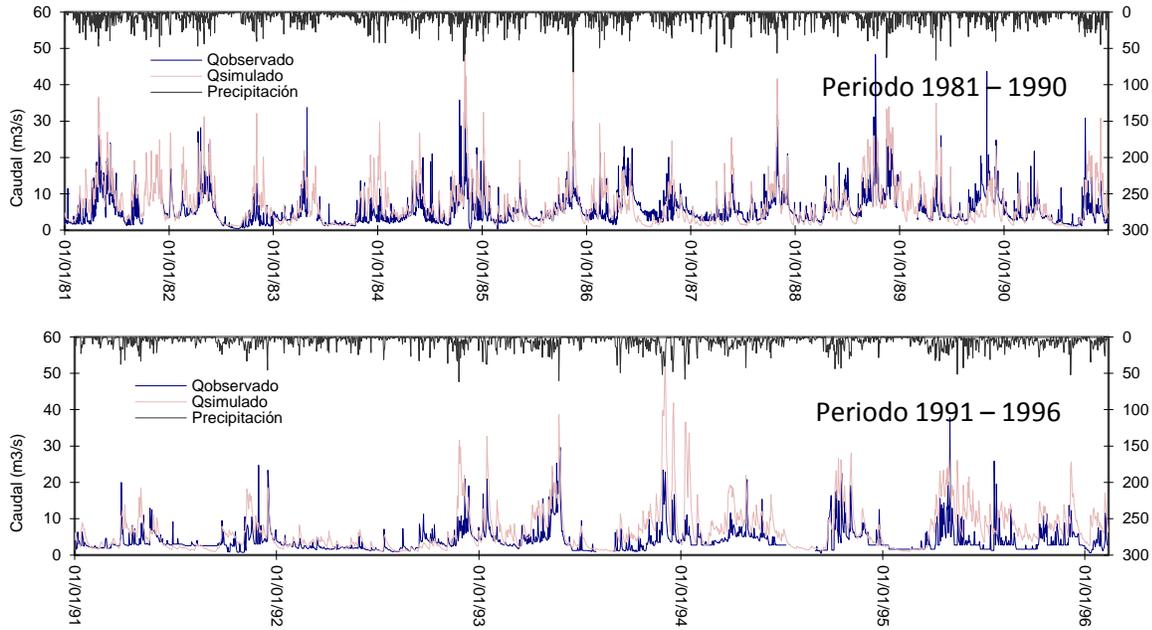


Figura 61. Estación Puente Juntas.



Parámetros estadísticos de calibración:

Q Med Simulado	7,006	MAE	RSME	NASH	RSR
Q Med Real	5,061	3,45	1,86	-0,64	1,28

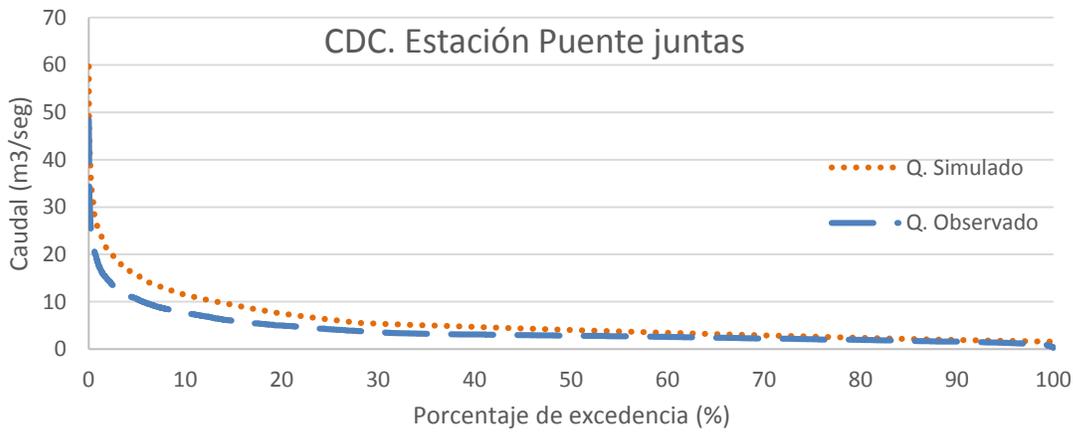
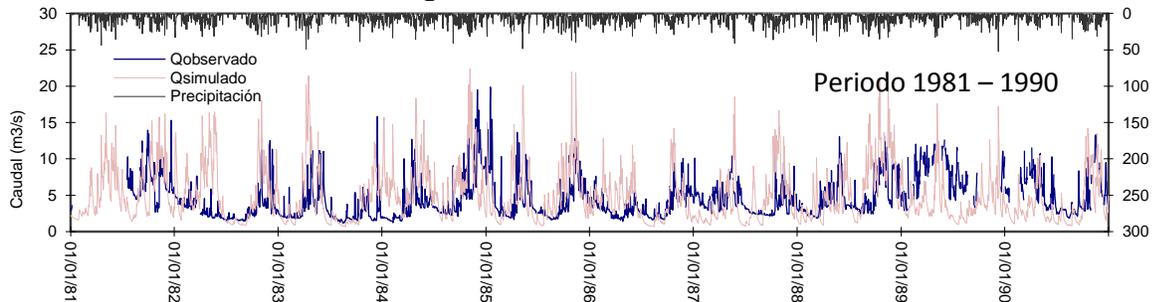
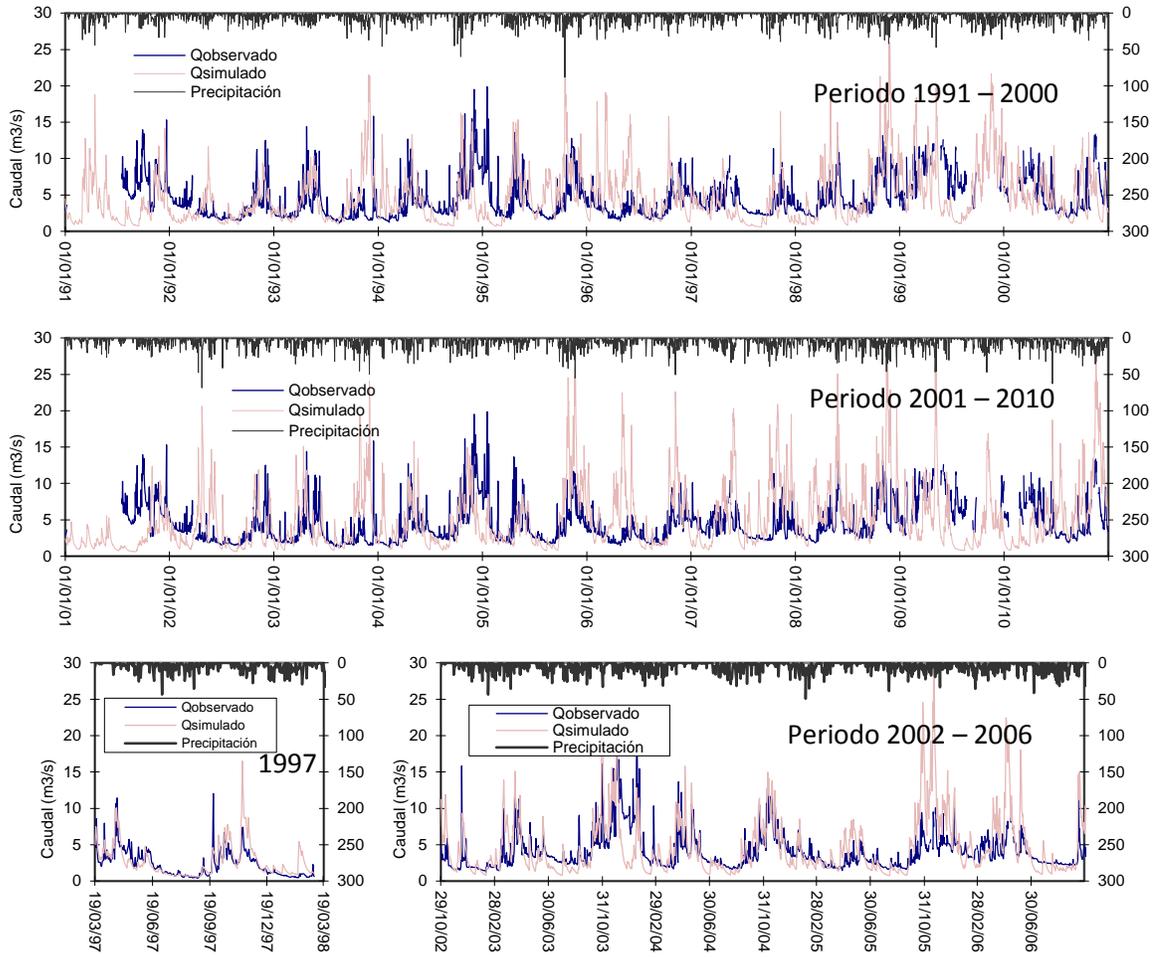


Figura 62. Estación Costa Azul.





Parámetros estadísticos de calibración:

Q Med Simulado	4,816	MAE	RSME	NASH	RSR
Q Med Real	4,044	2,98	1,73	-0,85	1,36

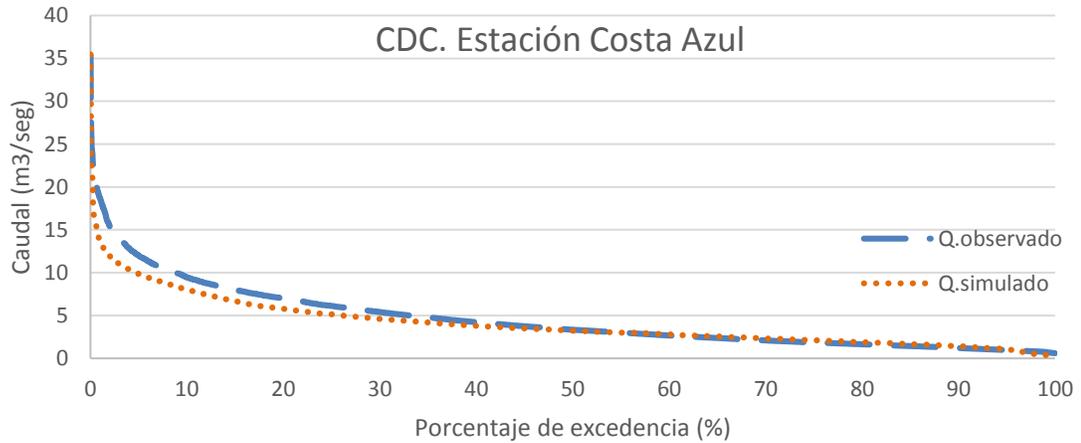
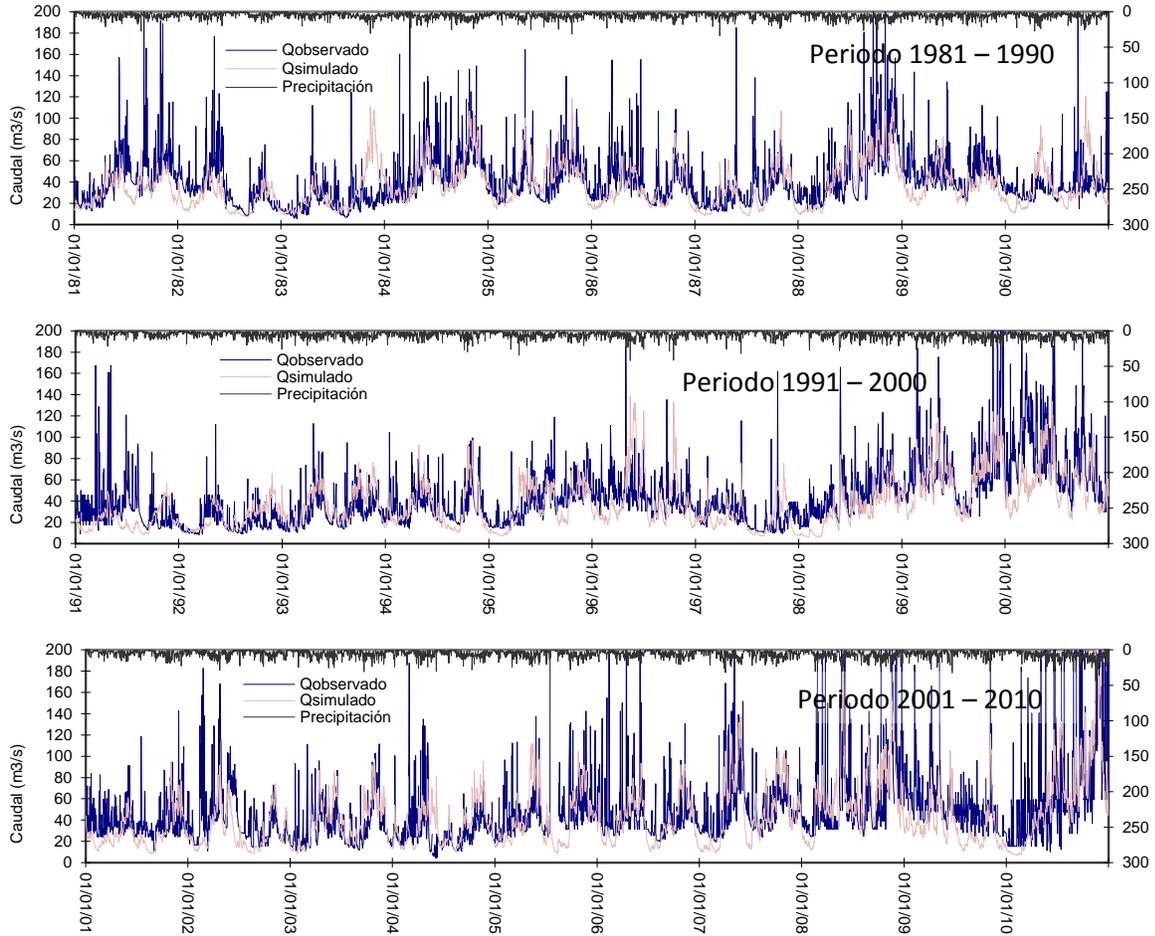


Figura 63. Estación Quitasueño – Arma.



Parámetros estadísticos de calibración:

Q Med Simulado	38,092	MAE	RSME	NASH	RSR
Q Med Real	44,025	17,48	4,18	0,18	0,90

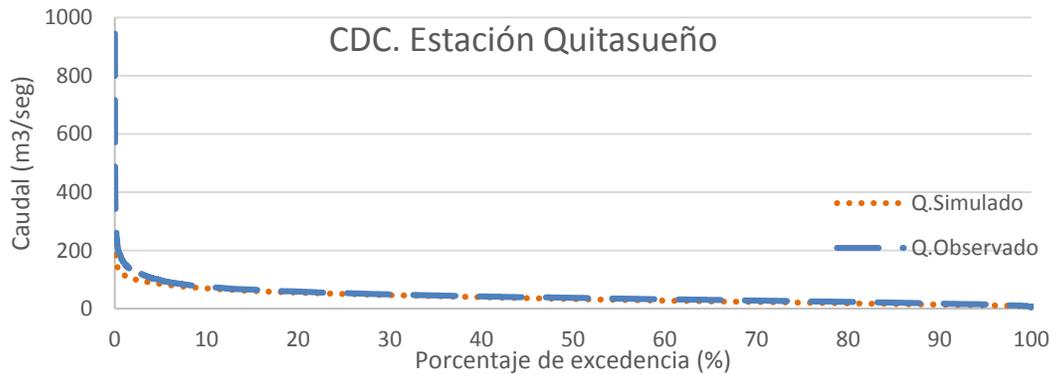
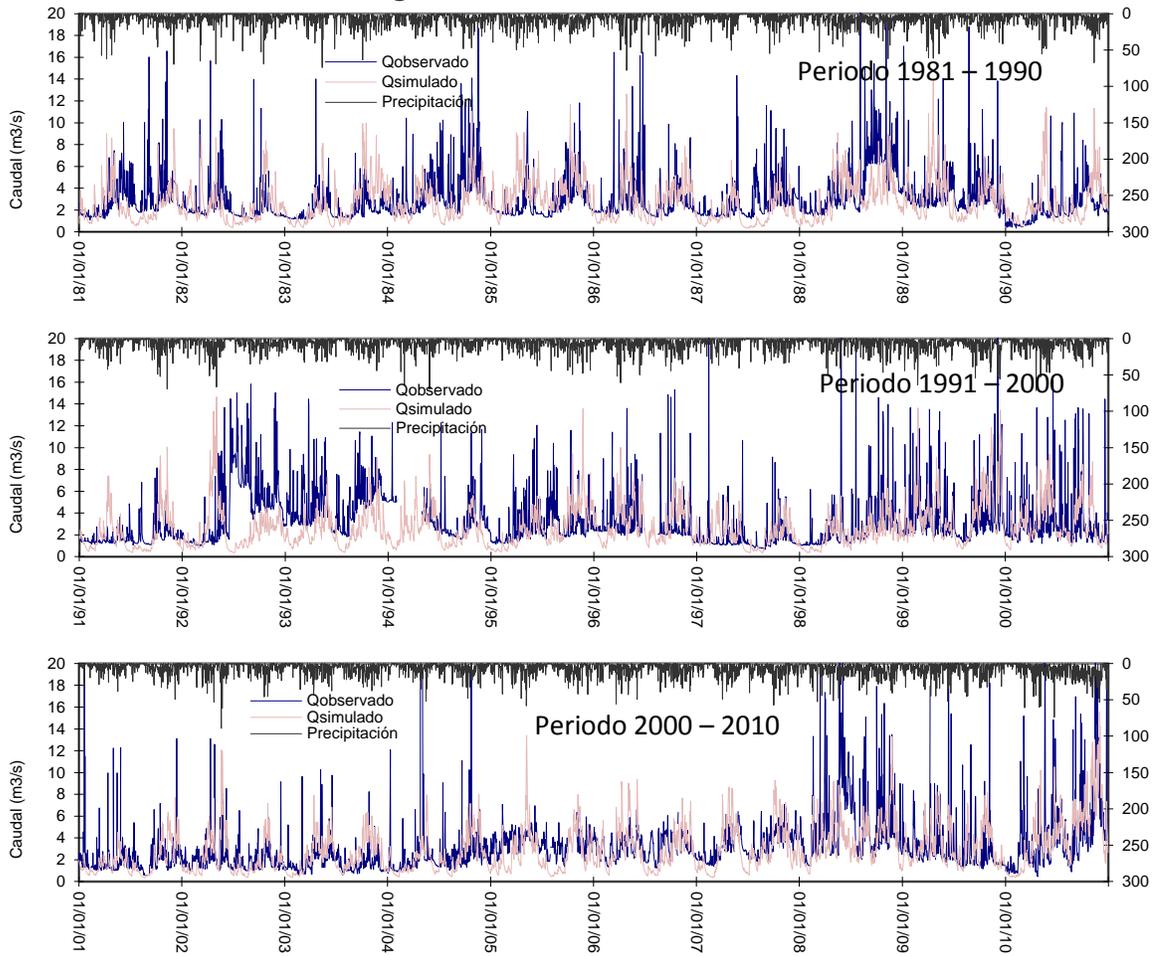


Figura 64. Estación Sonsón – Arma.



Parámetros estadísticos de calibración:

Q Med Simulado	2,713	MAE	RSME	NASH	RSR
Q Med Real	3,095	1,70	1,30	-0,19	1,09

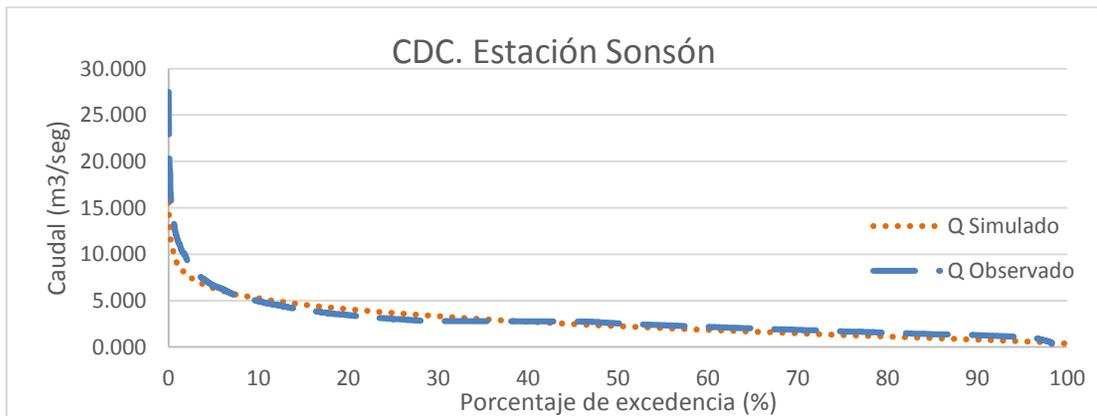
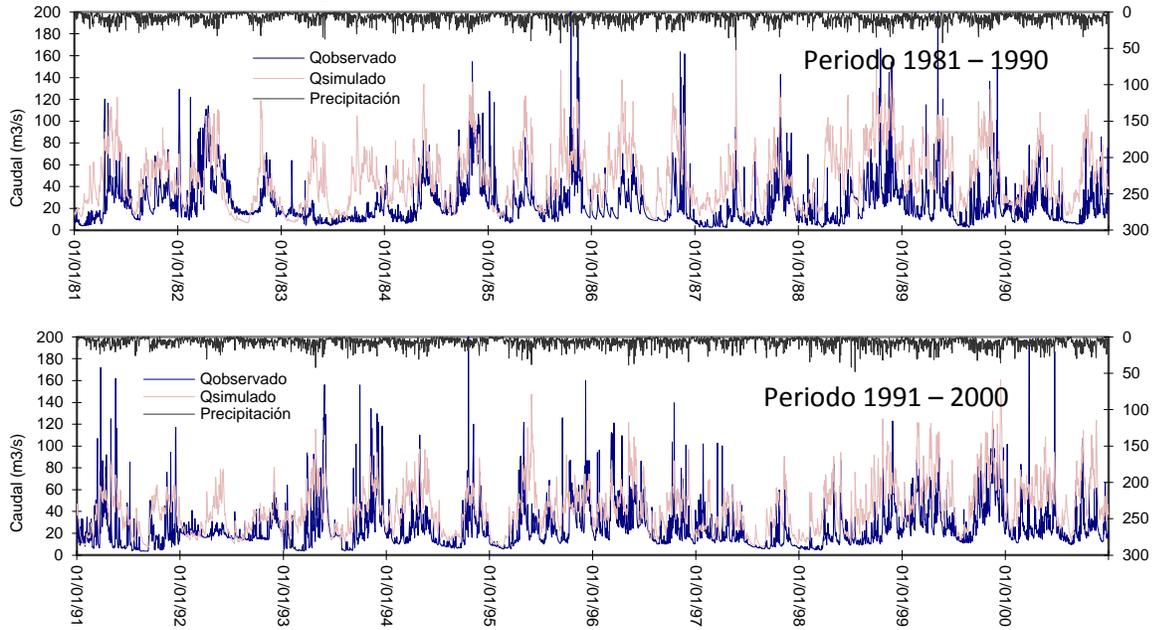
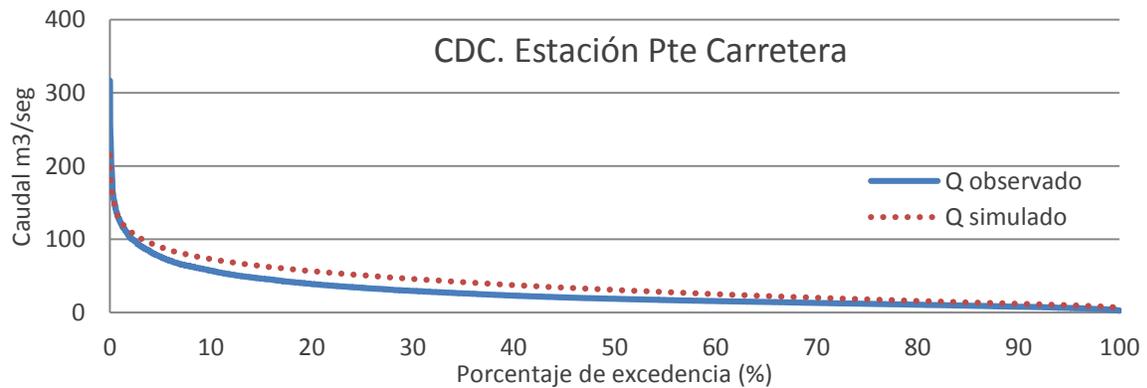


Figura 65. Estación Puente carretera – Guarinó.



Parámetros estadísticos de calibración:

Q Med Simulado	2,713	MAE	RSME	NASH	RSR
Q Med Real	3,095	1,70	1,30	-0,19	1,09



El proceso de calibración intentó promover una regionalización de parámetros que obedecen a una respuesta física de los procesos naturales, obteniendo buen comportamiento y desempeño de las series simuladas frente a las observadas en estaciones como La Paila, puente juntas y Quitasueño para caudales medios, mínimos y recesión; siendo precisos en que la calibración no considera eventos máximos y que los datos observados en tal escenario no sólo registran caudal líquido sino sólido, por tal razón los coeficientes sugieren procesos de calibración y validación no satisfactorios.

Una vez calibrado y validado el modelo, se procedió a realizar las simulaciones sobre las áreas de interés; particularmente sobre cada una de las áreas aferentes de los acueductos municipales de Salamina con los ábacos de Chagualito, El Uvito y Boquerón; de La Merced con los ábacos de La Isabela, El Rosario y Santana; y de Norcasia con los ábacos Las Pavas, Montebello y La Virgen, elegidos para la estimación del déficit hídrico. A continuación se presentan los resultados del balance hídrico para cada ábaco (Tabla 15) y a manera de ejemplo los resultados gráficos sobre los ábacos de Salamina (Figura 66, Figura 67, Figura 68 y Figura 69):

Tabla 15. Balance hídrico anual ábacos municipales objeto de estudio.

Acueducto Municipal	Salamina			La Merced			Norcasia		
	Chagualito	Boquerón	El Uvito	La Isabela	El Rosario	Santana	Las Pavas	Montebello	La Virgen
Precipitación (mm/año)	1951	1931	2602	1879	1879	1879	3847	3907	3907
Temperatura (°C)	11	11	11	20	21	21	19	19	19
ETP (mm/año)	815	815	815	1214	1240	1272	1026	1026	1026
ETR (mm/año)	699	697	729	947	962	980	927	928	928
Escorrentía (mm/año)	533	537	920	369	359	347	2175	2313	2313
Interflujo (mm/año)	529	515	736	422	418	412	575	545	545
Flujobase (mm/año)	192	183	218	145	144	144	171	124	0
Caudal (L/s)	93.9	46.4	343.8	12.8	7.5	11.6	25.4	26.1	6.6

Figura 66. Balance diario (Chagualito).

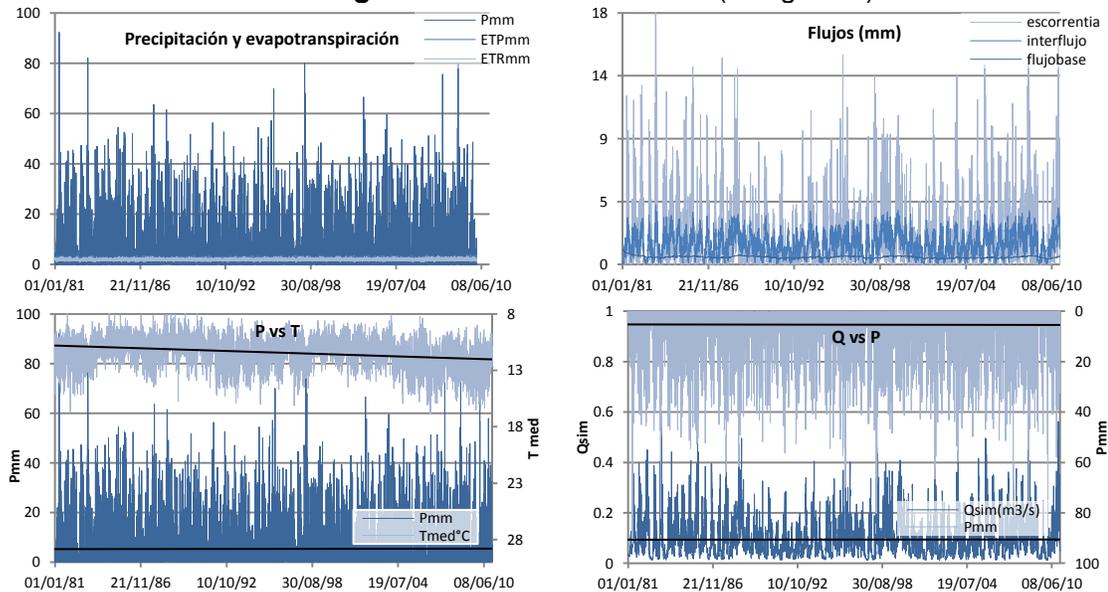


Figura 67. Balance mensual (Chagualito).

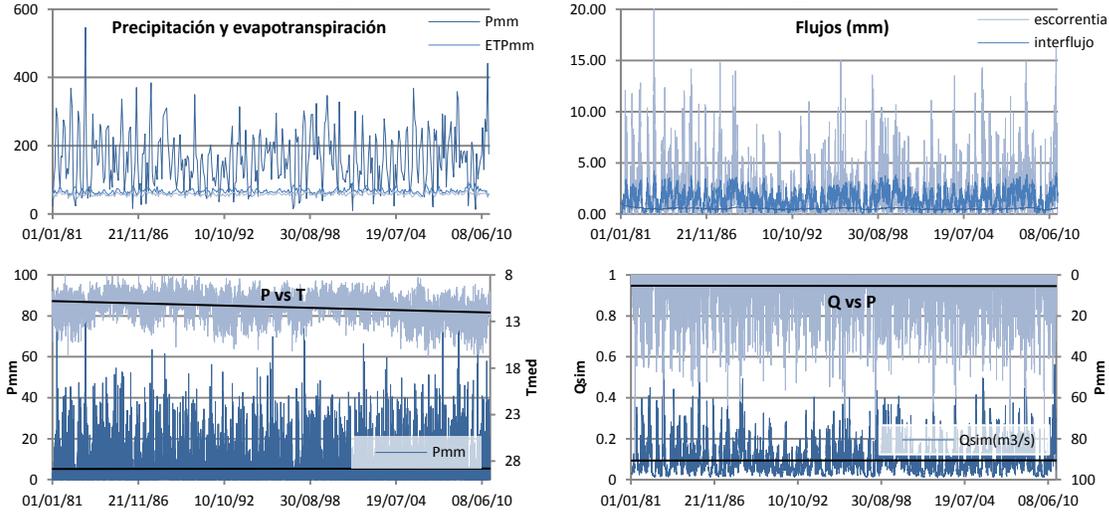


Figura 68. Balance Anual (Boquerón).

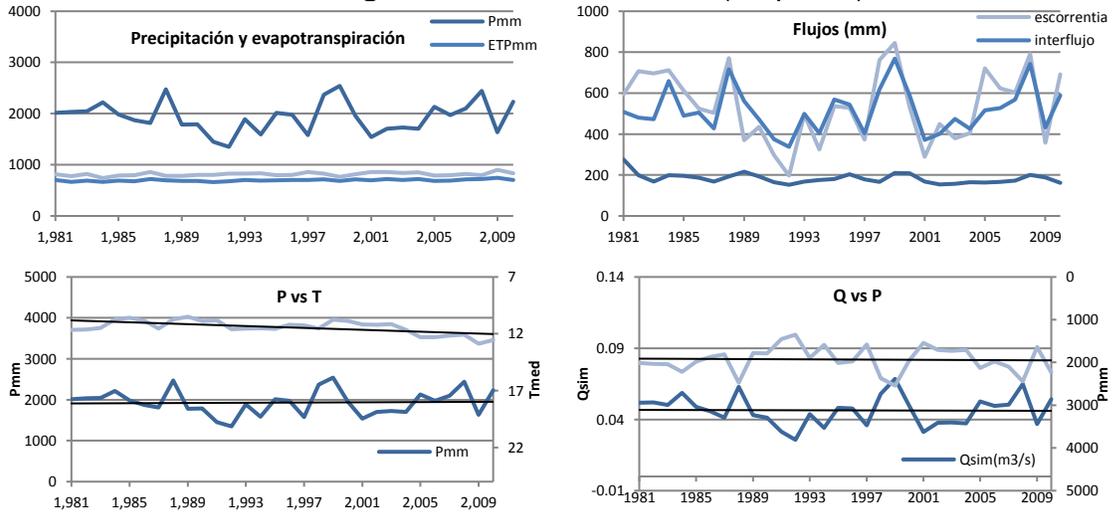
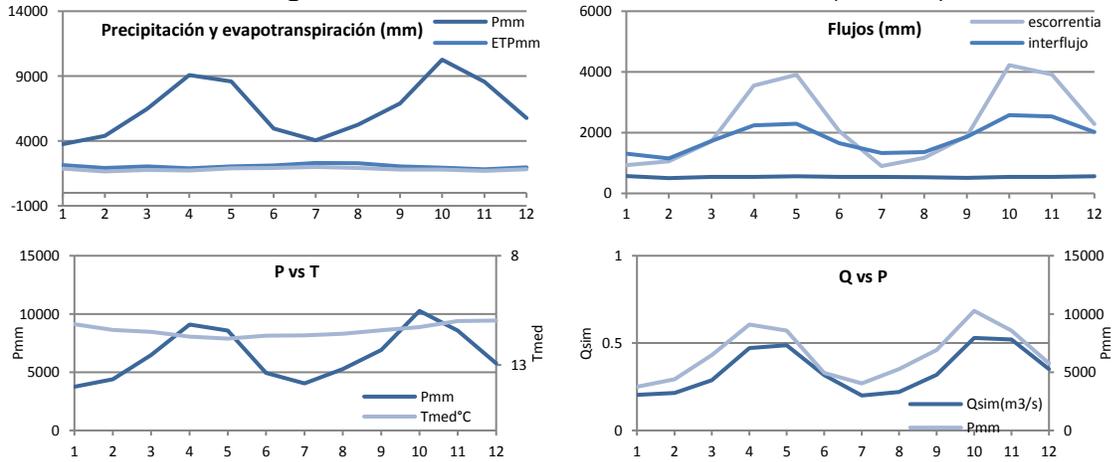


Figura 69. Balance Mensual Multianual (El Uvito).



El balance diario y mensual permite identificar la estrecha relación entre la precipitación y los caudales, específicamente de escorrentía, así como la dinámica entre las condiciones climáticas representadas por la precipitación (con tendencia constante) y la temperatura (con una tendencia al incremento). El balance anual permite identificar las oscilaciones entre años húmedos, normales y secos muchas veces relacionados con el ENSO, así como la dinámica del flujo base en función del contexto climático. El balance mensual multianual permite comprobar la prevalencia del régimen climático bimodal y el condicionamiento sobre caudales de escorrentía, mientras la irrelevancia sobre la evapotranspiración y la respuesta del flujo base. Los efectos de la variabilidad climática se pueden identificar comparando el caudal mensual multianual bajo condiciones normales frente a condiciones en ENSO en su fase cálida (Figura 70 y Tabla 16).

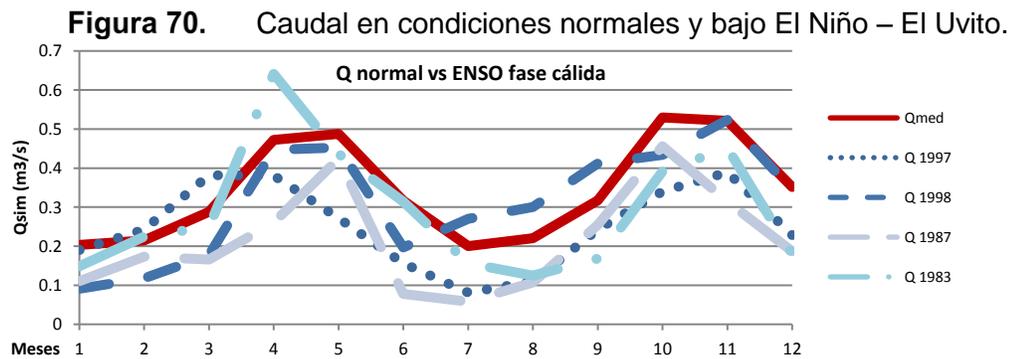
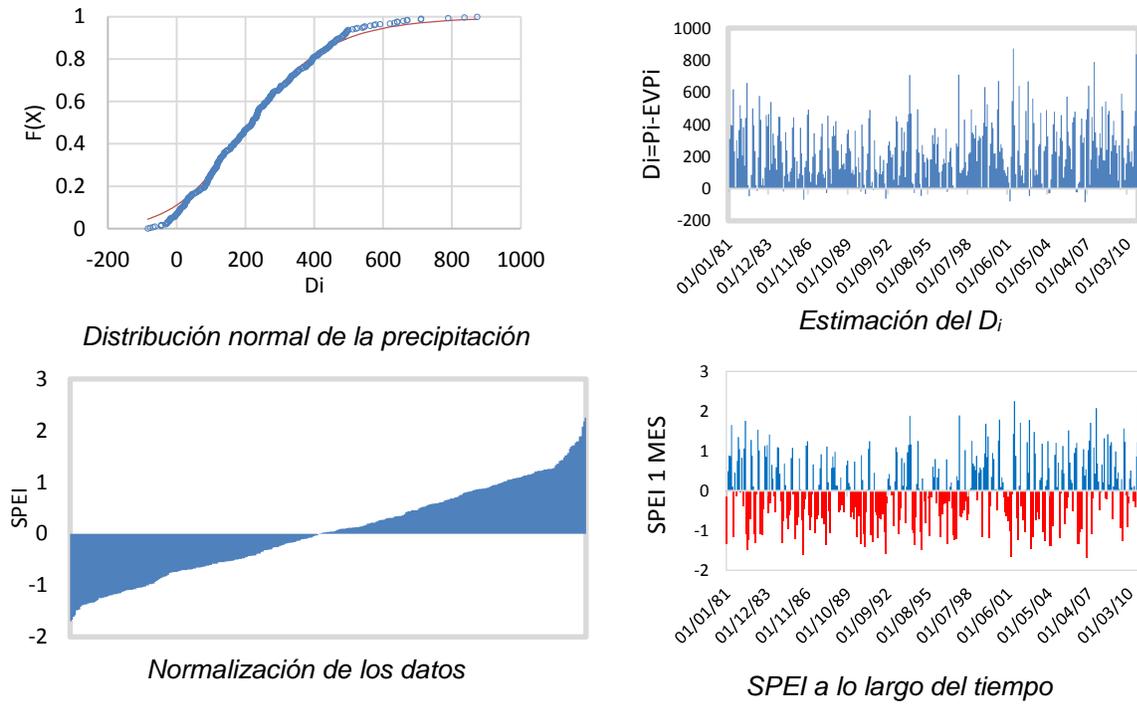


Tabla 16. Relación caudales mínimos y ONI.

Fecha	23/08/02	05/07/92	01/07/87	30/06/87	04/07/92	10/07/97	29/06/87	22/08/02	03/07/92	09/07/97	08/07/97	02/07/92	28/06/87	07/07/97	08/07/91
Q Mínimo (L/s)	37.3	37.9	38.2	38.3	38.3	38.4	38.7	38.7	38.7	38.8	39.2	39.2	39.3	39.6	39.7
ONI	0.9	0.4	1.2	1	0.7	1.6	1.2	0.9	1.6	1.6	1.6	0.4	1.2	1.6	0.7

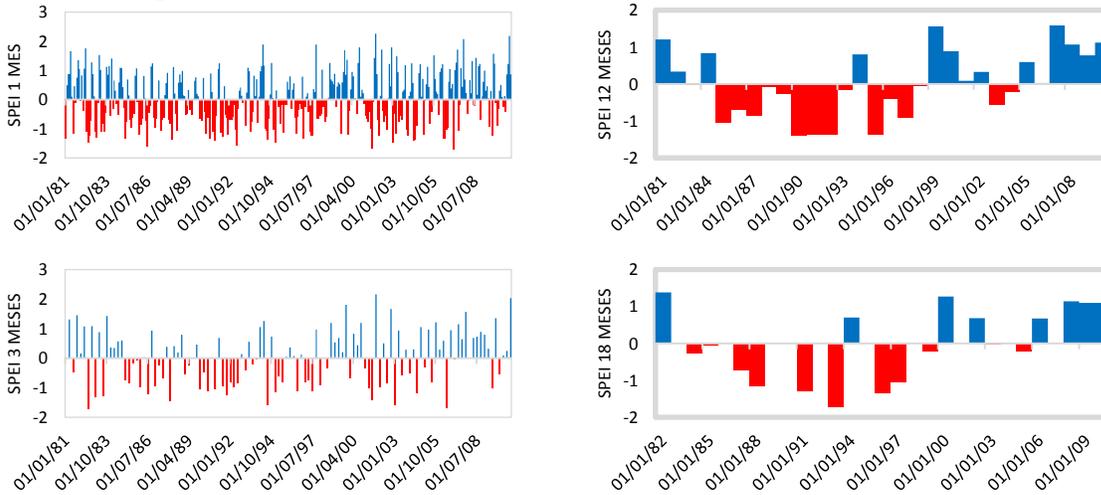
El contexto de variabilidad climática se refleja en el análisis comparativo de los caudales mínimos y la categoría del ENSO en fase cálida. Posteriormente se estimó el indicador SPEI para caracterizar inicialmente la sequía meteorológica en el entendido que es útil frente a un sistema de alerta temprana. Se considera oportuno el análisis de la sequía meteorológica por las siguientes razones: Calidad y cantidad de datos disponibles de precipitación y temperatura, Perspectiva de alertas tempranas y la modelación hidrológica permite subsanar el desfase temporal de la sequía hidrológica frente a la meteorológica. La Figura 71 muestra los resultados para algunos ábacos de Norcasia:

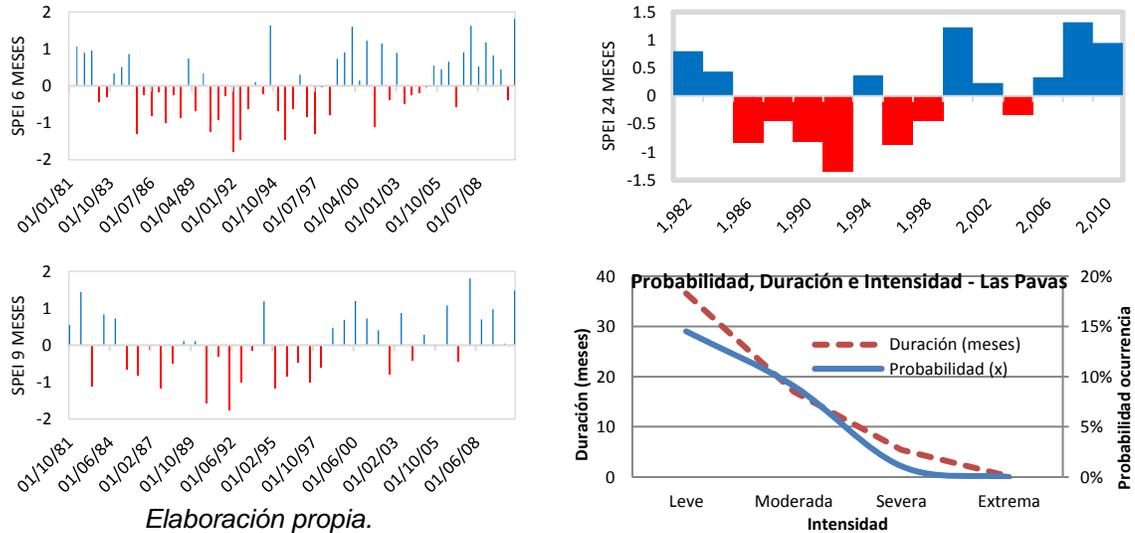
Figura 71. Estimación del SPEI – 1 mes sobre el ábaco de Montebello – Norcasia.



El mismo procedimiento se realizó para diferentes escalas temporales tales como 3, 6, 9, 12, 18 y 24 meses. La Figura 72 muestra los resultados para Las Pavas, acompañado de la caracterización de la sequía en términos de intensidad, duración y probabilidad:

Figura 72. Resultados SPEI para el ábaco de Las Pavas – Norcasia.





Los resultados de caracterización de la sequía por medio del SPEI relacionados con la amenaza por déficit hídrico son consistentes en cuanto a que los eventos de intensidad leve o moderada cuentan con mayor probabilidad de ocurrencia y mayor duración que los eventos de intensidad severa o extrema. Existe baja probabilidad de ocurrencia de sequías severas o extremas sin que ello implique que no se vayan a presentar, tomando mayor relevancia la duración de tales eventos puesto que, como lo muestra la gráfica del SPEI de 24 meses, los efectos acumulados por déficit atmosférico son causales de desabastecimiento. Las causas de la sequía obedecen a factores globales; los efectos presentan gran variación tal como se observó en los resultados obtenidos para la subzona hidrográfica de Tapias y otros directos (Salamina y La Merced) frente a los resultados de la subzona hidrográfica de Samaná-La Miel (Norcasia).

El ENSO en su fase cálida es posible identificarlo a través del SPEI obtenido y los efectos acumulados son representados en las series del índice pudiendo observar los eventos de magnitud moderada y fuerte en periodos como 1986-1987, 1991-1992 y 1997-1998. La interpretación de los resultados obtenidos para el SPEI para los acueductos son las siguientes: 1 mes: No siempre representa los impactos de la sequía asociados a la duración de los eventos analizados y tal como lo propone la recesión, no es suficiente ausencia de lluvias durante un mes para que se materialice el desabastecimiento; soportado con los análisis de recesión del presente estudio; los resultados del SPEI para los años húmedos 2008, 2009 y 2010 respaldan tal afirmación. 3 meses: marcan el inicio y fin de un periodo seco para acueductos como Norcasia y La

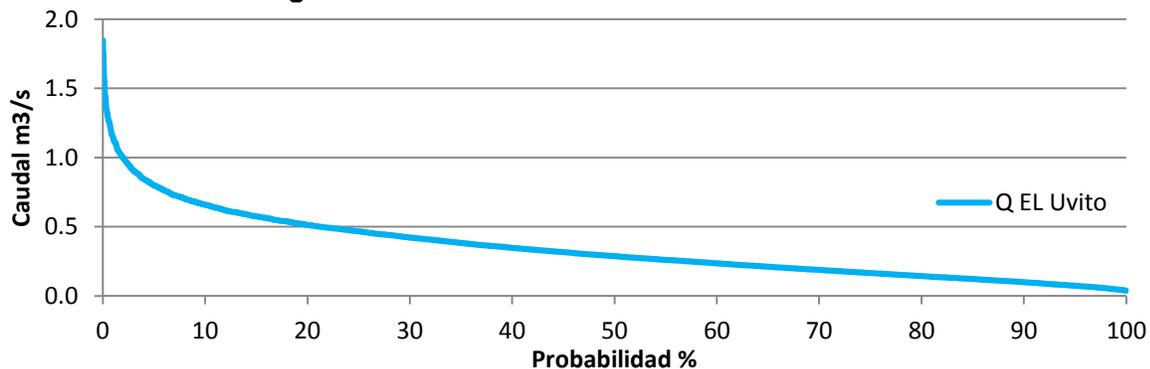
Merced en donde empiezan a presentarse caudales bajos, permitiendo generar una prealerta. 6 meses: Se consolida la sequía con caudales mínimos en las fuentes hídricas y en caso de contar con reservorios o embalses, se dará el inicio a reducción de niveles en los mismos, permitiendo generar una alerta que promueva la ejecución de estrategias de uso eficiente y ahorro. 9 meses: En conjunto con el SPEI de 6 meses, pueden determinar la intensidad del evento con gran certeza y es necesario declarar emergencia para adoptar medidas de adaptación/mitigación. 12-18-24 meses: permite identificar la duración del evento de sequía claramente consolidado con grandes afectaciones incluso sobre las aguas subterráneas y que requieren la implementación de medidas de manejo y recuperación junto con el seguimiento desde el origen (evolución de la TSM) hasta la evolución del abastecimiento y la implementación de los planes de contingencia.

En términos de abastecimiento se considera inapropiado separar el flujo base envolvente puesto que todo el régimen de caudales hace parte del abastecimiento y contribuye a que sobre una fuente se presuma una suficiencia hídrica. La curva de duración de caudales ha permitido identificar la permanencia de caudales a lo largo del tiempo, suponiendo una disponibilidad hídrica en términos temporales porcentuales y es el producto de la modelación hidrológica inicial más importante para el análisis de la oferta hídrica disponible que, en conjunto con la demanda, permite establecer la amenaza de abastecimiento por déficit hídrico (Tabla 17 y Figura 73).

Tabla 17. Curva de duración de Caudales – El Uvito:

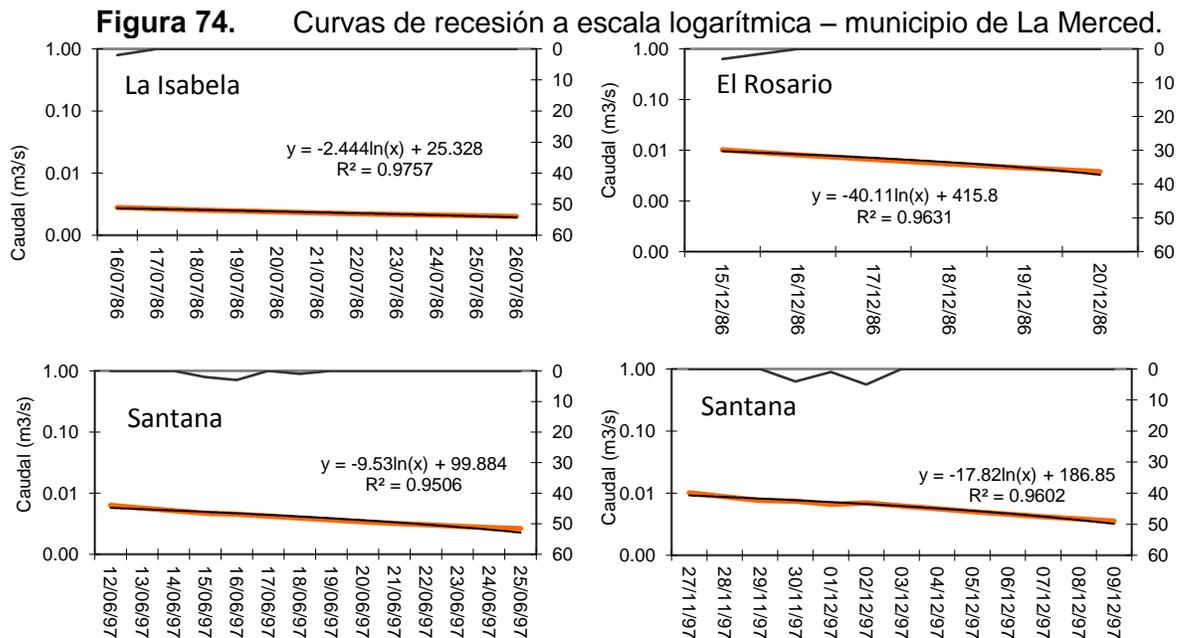
P (%)	Q0.01	Q1	Q10	Q25	Q50	Q65	Q75	Q85	Q90	Q95	Q97.5
Q (m ³ /s)	1.8464	1.1452	0.6593	0.4661	0.2867	0.2110	0.1652	0.1225	0.0990	0.0734	0.0593

Figura 73. Curva de duración de caudales – El Uvito.



Analizando la diferencia entre caudales con una permanencia del 10% frente a caudales con una permanencia del 90% es posible concluir que existe gran variación en los caudales a lo largo del tiempo lo que supone un reto en términos de administración; por tal razón los acueductos tienden a suponer suficiencia hídrica de las fuentes actuales.

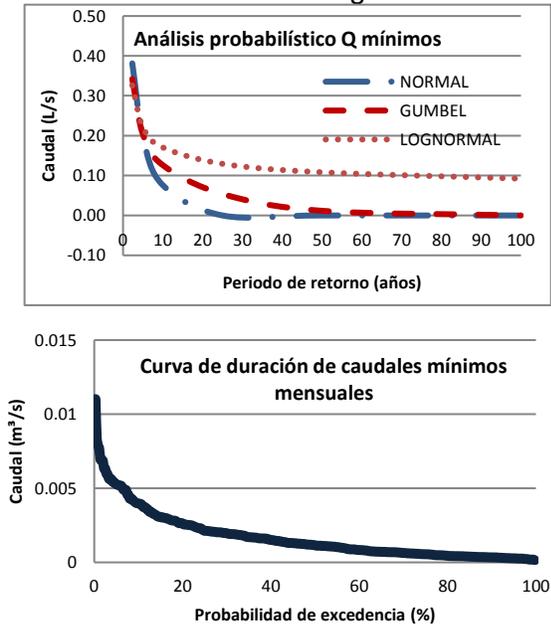
Las curvas de recesión permiten identificar la reducción de caudal a lo largo de un periodo de sequía y representa las condiciones de conductividad del subsuelo ante la ausencia de precipitación. Al obtener los parámetros de la ecuación logarítmica asociada, es posible inferir el tiempo que toma el abatimiento del caudal medio frente al caudal del 95% de excedencia, ejercicio realizado sobre los nueve ábacos de los tres municipios analizados con un promedio de 75 días lo cual permite ir adelantando diferentes actividades para reducir los impactos de un periodo seco. A continuación se presentan algunas curvas de recesión estimadas (eje Y en escala logarítmica), específicamente sobre los ábacos de La Merced La Isabela, El Rosario y Santana (Figura 74):



Adicionalmente se realizaron análisis probabilísticos de caudales mínimos para cada ábaco. Algunos resultados se muestran a continuación 0 y Figura 75:

Tabla 18. Análisis probabilístico de caudales mínimos – Ábaco La Virgen - Norcasia.

Figura 75. Caudales mínimos La Virgen.



FUNCIÓN DE PROBABILIDAD GUMBEL - LA VIRGEN

TR	2.33	5	10	25	50	100
K	-0.32	-0.82	-1.10	-1.36	-1.51	-1.64
Q	0.34	0.20	0.13	0.05	0.0	0.0

FUNCIÓN DE PROBABILIDAD NORMAL - LA VIRGEN

TR	2.33	5	10	25	50	100
K	-0.18	-0.84	-1.28	-1.75	-2.05	-2.33
Q	0.38	0.20	0.08	0.0	0.0	0.0

FUNCIÓN DE PROBABILIDAD LOGNORMAL - LA VIRGEN

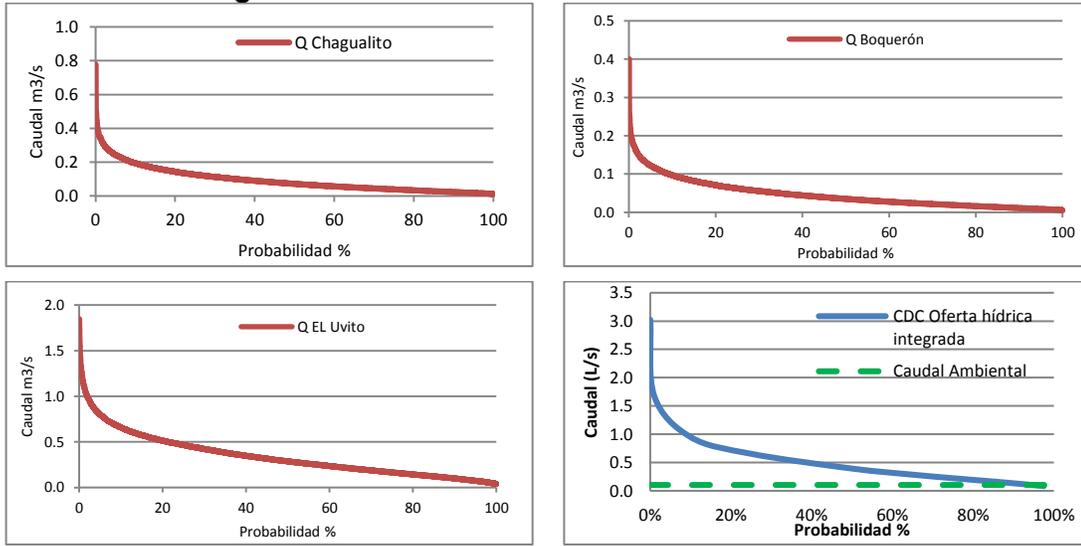
TR	2.33	5	10	25	50	100
K	-0.18	-0.84	-1.28	-1.75	-2.05	-2.33
Kln	-0.377	-0.758	-0.940	-1.088	-1.165	-1.223
Q	0.3	0.22	0.17	0.13	0.11	0.92

TR (Años)	Q (L/s)
2.33	0.3
5	0.2
10	0.1
25	0.06
50	0.04
100	0.03

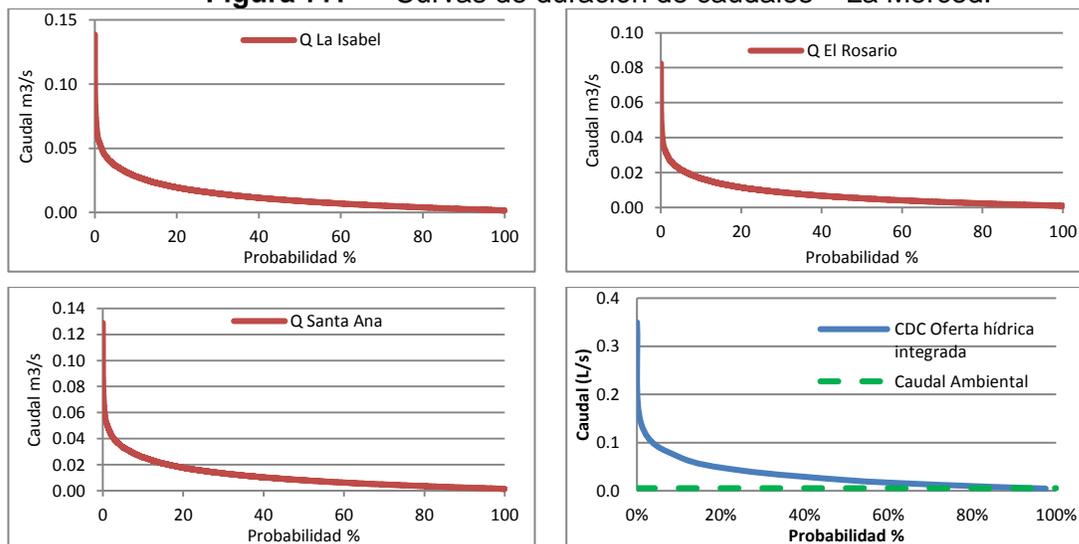
La función de probabilidad teórica aplicada recomendada para análisis de éste tipo es la Gumbel, que representa la caída a caudal igual a cero con un comportamiento promedio referente a las demás metodologías. Adicionalmente el análisis probabilístico permite estimar para diferentes caudales, el periodo de retorno sobre el cual se presentan caudales mínimos.

La amenaza integrada es un concepto propuesto, definido como el análisis de abastecimiento desde diferentes fuentes hídricas para una comunidad y a través de la metodología planteada se logra caracterizar el régimen hídrico en función y su relación con lo requerido por la cabecera municipal.

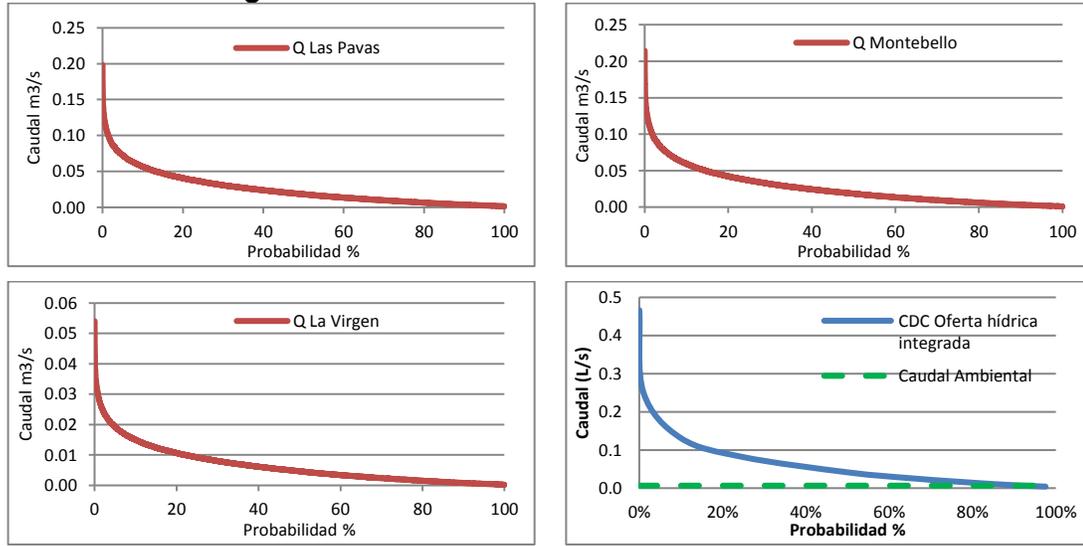
A continuación se presentan los resultados de la amenaza integrada con la descripción de permanencia de caudales (Figura 76, 0 y 0), días de recesión y la estimación probabilístico de caudales mínimos y de abastecimiento; alineados a los objetivos de la Política Nacional del Recurso Hídrico para las nueve fuentes hídricas objeto de análisis integrado, en el contexto del abastecimiento municipal de Salamina (Tabla 19), La Merced (Tabla 20) y Norcasia (Tabla 21):

Figura 76. Curvas de duración de caudales – Salamina.**Tabla 19.** Resultados amenaza integrada acueducto municipal Salamina.

Municipio	Salamina			
Registros oferta hídrica	Chagualito	Boquerón	El Uvito	Subtotal
Oferta hídrica total disponible = 0 en todos los casos				
TR (años) déficit hídrico	1.3	1.3	1.2	1.3
Recesión Qmed-Q95% (días)	79	83	44	69
Caudales mínimos (L/s)				
TR 2.33	14.8	7	51.9	73.7
TR 5	12.5	5.9	41	59.4
TR 10	11.1	5.2	34.5	50.9
TR 25	9.7	4.5	28.1	42.4
TR 50	8.9	4.1	24.3	37.3
TR 100	8.1	3.8	20.9	32.8
Estadísticos				
QMED	93.9	46.4	343.9	161.4
QMIN	10.7	5.2	37.3	17.7
QMAX	777.6	400.3	1846.4	1008.1
DESV EST	75	37.9	238.4	117.1
VARIACION	5.6	1.4	56.8	21.3
CURTOSIS	4.65	4.95	3.04	4.21
RELACION QMAX-QMED	8	9	5	7
RELACION QMED-MIN	9	9	9	9
RELACION QMAX-QMIN	73	78	49	67

Figura 77. Curvas de duración de caudales – La Merced.**Tabla 20.** Resultados amenaza integrada acueducto municipal La Merced.

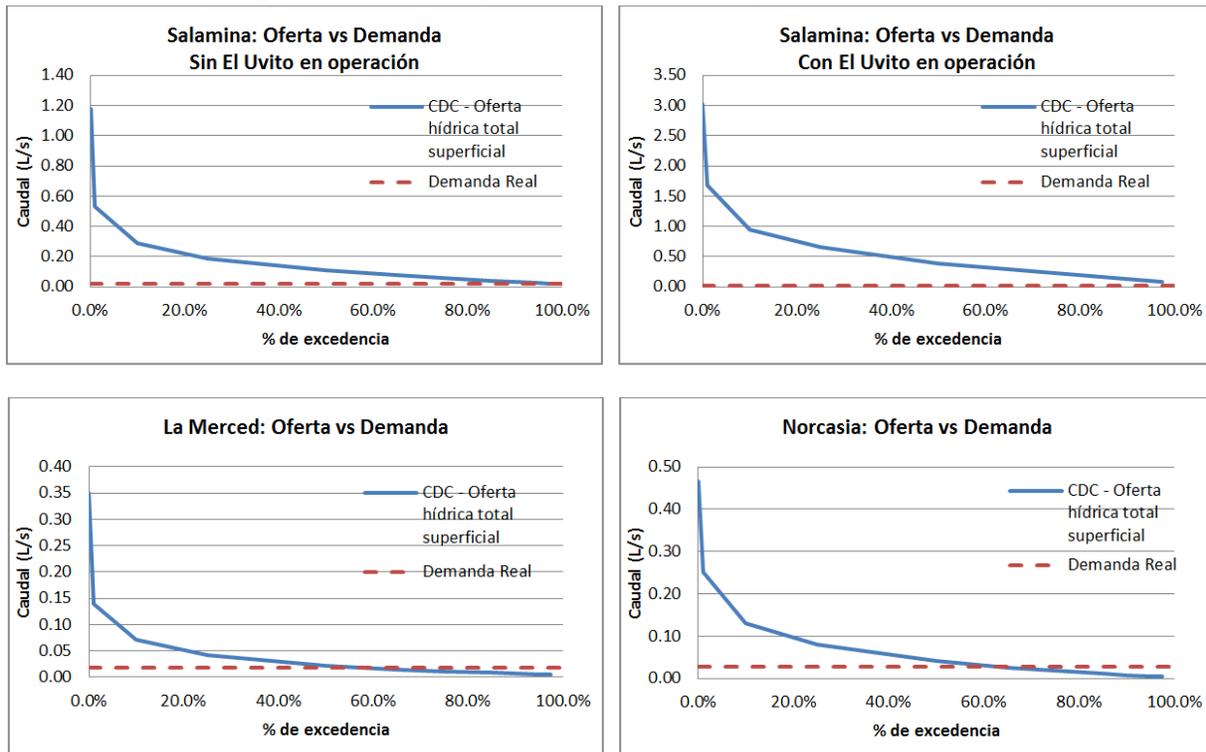
Municipio	La Merced				
	Registros oferta hídrica	La Isabel	El Rosario	Santana	Subtotal
Oferta hídrica total disponible = 0 en todos los casos					
TR (años) déficit hídrico		1.8	1.6	1.7	1.7
Recesión Qmed-Q95% (días)		83	87	87	86
Caudales mínimos (L/s)					
TR 2.33		1.8	1.1	1.7	4.6
TR 5		1.5	0.9	1.4	3.7
TR 10		1.3	0.8	1.2	3.2
TR 25		1.1	0.6	1	2.7
TR 50		0.9	0.6	0.9	2.4
TR 100		0.8	0.5	0.8	2.1
Estadísticos					
QMED		12.8	7.5	11.6	10.6
QMIN		1.4	0.8	1.3	1.2
QMAX		138.6	82.4	128.9	116.6
DESV EST		11.8	7	10.9	9.9
VARIACION		0.1	0	0.1	0.1
CURTOSIS		7.99	8.18	8.41	8.20
RELACION QMAX-QMED		11	11	11	11
RELACION QMED-MIN		9	9	9	9
RELACION QMAX-QMIN		97	98	98	98
Funcionamiento Infraestructura		Si	Si	Si	

Figura 78. Curvas de duración de caudales – Norcasia.**Tabla 21.** Resultados amenaza integrada acueducto municipal Norcasia.

Municipio	Norcasia				
	Registros oferta hídrica	Las Pavas	Montebello	La Virgen	Subtotal
Oferta hídrica total disponible = 0 en todos los casos					
TR (años) déficit hídrico		1.4	1.5	1.4	1.4
Recesión Qmed-Q95% (días)		70	68	68	69
Caudales mínimos (L/s)					
TR 2.33		1.9	1.4	0.3	3.6
TR 5		1.3	0.8	0.2	2.4
TR 10		1	0.5	0.1	1.6
TR 25		0.7	0.2	0.06	1
TR 50		0.5	0.2	0.04	0.7
TR 100		0.4	0.1	0.03	0.6
Estadísticos					
QMED		25.4	26.1	6.6	19.3
QMIN		1.2	0.6	0.1	0.7
QMAX		198.2	214.4	54.1	155.6
DESV EST		23.3	24.9	6.3	18.2
VARIACION		0.5	0.6	0	0.4
CURTOSIS		4.01	4.15	4.15	4.10
RELACION QMAX-QMED		8	8	8	8
RELACION QMED-MIN		21	44	44	36
RELACION QMAX-QMIN		163	362	362	296
Funcionamiento Infraestructura		Si	Si	Si	

El análisis de suficiencia hídrica lleva a concluir que las fuentes hídricas no tienen la capacidad para abastecer los acueductos objeto de análisis bajo condiciones de sequía recurrentes (TR=1.5 años en promedio) y representa grandes conflictos entre los usuarios del recurso hídrico y la demanda ambiental. Lo anterior plantea la necesidad de recurrir a fuentes alternas, proyectar planes de contingencia y/o adelantar acciones que busquen regular la oferta hídrica de una corriente con infraestructura ambiental. La estimación de caudales mínimos permite identificar en términos probabilísticos, la posibilidad de que un caudal con determinada magnitud se presente y los límites inferiores de oferta disponible, así como la identificación de caudales mensuales mínimos en términos de permanencia. Los parámetros estadísticos han sido útiles en cuanto al entendimiento de las condiciones medias, máximas y mínimas, así como el rango sobre el cual fluctúan los caudales de las fuentes objeto de análisis y las relaciones entre caudales extremos y medios, validando la existencia de eventos extremos que condicionan el abastecimiento hídrico. En lo referente a la demanda se tienen dos escenarios para Salamina y es sin la operación de la infraestructura de El Uvito y con la operación de la misma. Se presentan los resultados por acueducto municipal (Figura 79):

Figura 79. Comparativo de la oferta y la demanda hídrica.



El balance entre la oferta y la demanda sugiere la disponibilidad de caudales para el abastecimiento bajo condiciones húmedas en los tres acueductos. No obstante bajo condiciones medias y mínimas se evidencia desabastecimiento; para Salamina es particular el análisis puesto que la fuente El Uvito cuenta con problemas técnicos relacionados con su infraestructura que dificultan el abastecimiento desde allí y el balance sugiere desabastecimiento producto del conflicto con el caudal ambiental, situación que desaparece con la conexión al sistema de la misma. Para La merced se obtuvo desabastecimiento durante un 59% y para Norcasia durante un 62% del tiempo.

Por otra parte, la hipótesis considerada en términos de calidad plantea que, como los análisis de la Dirección Territorial de Salud de Caldas arrojaron como resultado que las aguas son aptas para consumo humano (concepto favorable - autorización sanitaria), no se altera la disponibilidad hídrica por contaminación.

5.1.4 Estimación y análisis de índices hídricos

A partir de los caudales simulados se realizó la estimación de los índices hídricos y por su puesto las características de intensidad, duración y frecuencia. En primera instancia se presentan los indicadores establecidos en el contexto nacional a través del IDEAM en términos de régimen hídrico, aridez, uso o escasez, vulnerabilidad al desabastecimiento y vulnerabilidad frente a eventos torrenciales (Tabla 22):

Tabla 22. Resultados de los indicadores promedio por municipio.

Indicadores e índices	Referente	Salamina		La Merced		Norcasia	
IRH	ENA 2014	0.21	Muy bajo	0.19	Muy bajo	0.16	Muy bajo
IA	ENA 2014	0.14	Altos Excedentes	0.22	Entre moderado y excedentes	0.09	Altos Excedentes
IUA	ENA 2014	Agotamiento	Crítico	Agotamiento	Crítico	Agotamiento	Crítico
IVH	ENA 2014		Muy alta		Muy alta		Muy alta
IVET	ERA 2013		Media		Media		Media

Los índices nacionales sobre los tres municipios arrojaron como resultado una muy baja regulación y retención hídrica, así como altos excedentes hídricos para Salamina y Norcasia y ente moderado y excedentes para La Merced en términos de aridez. Referente al uso de agua y tal como se mencionó anteriormente se obtuvo agotamiento puesto que en épocas de estiaje la oferta hídrica se reduce considerablemente.

Finalmente, la vulnerabilidad hídrica al desabastecimiento es muy alta y la vulnerabilidad frente a eventos torrenciales es media. Finalmente cabe destacar el alto grado de incertidumbre que tienen los resultados producto de un alto coeficiente de variación de los caudales (Salamina=68%, La Merced=94% y Norcasia=89%) Lo cual se puede relacionar con la gran fluctuación que presentan las condiciones climáticas y por tanto los caudales objeto de abastecimiento. Adicionalmente es importante reconocer que existe incertidumbre relacionada con los insumos, específicamente por las incertidumbres durante el monitoreo hidroclimatológico, así como del modelo hidrológico utilizado.

5.2 Efectos futuros por cambio climático en la oferta hídrica

A través del proyecto “Coupled Modeling Intercomparison Project 5” del IPCC, diferentes institutos se ocuparon en generar diferentes escenarios de cambio climático a través de las proyecciones propuestas con los modelos bbc-csm1-1, CanCM4, CCSM4, CNR-CM5, CSIRO-MK3-6-0, FGOALS-g2, GFDL-CM3, GFDL-ESM2G, GFDL-ESM2M, GISS-E2-R, GISS-EH-H, HadCM3, HadGEM2-ES, inmcm4, IPSL-CM5A-LR, MIROC4h, MIROCS, MPI-ESM-LR y MRI-CGCM3. El referente utilizado es la tesis “*Modelación hidrológica y agronómica de los efectos del cambio y la variabilidad climática en la producción cafetera de Caldas*” desarrollada por la codirectora del presente estudio y tal análisis contempló las diferentes proyecciones de cambio climático (Ocampo López, 2017). El análisis objeto del presente estudio es considerar una de las proyecciones más desfavorables en términos hídricos e incorporarla en la modelación hidrológica para estimar los efectos en el desabastecimiento con el escenario seleccionado.

5.2.1 Selección de modelos de cambio climático

Entre los modelos considerados en el estudio mencionado se consideró como hipótesis que el modelo aplicable al presente ejercicio es el que arrojó como resultado las menores precipitaciones y las más altas temperaturas. Tal modelo fue el MPI-ESM-LR del Max Planck Institute for Meteorology de Alemania. Cabe destacar que entre los modelos utilizados, los modelos MPI-ESM-MR y NorESM-1 tuvieron el mejor desempeño para la representación del ciclo anual histórico y los eventos extremos de precipitación y los modelos CNRM-CM5 y MPI-ESM-MR de temperatura (Ocampo López, 2017).

5.2.2 Análisis de línea base

Las estaciones utilizadas en los ábacos objeto de estudio son Salamina Conc. Bar y TRMM 222_1139 para los acueductos de Salamina y La Merced y Norcasia para los ábacos del municipio con el mismo nombre.

5.2.3 Estimación condiciones futuras

La estimación de series futuras consiste en la generación de series sintéticas que proyecten las tendencias de las series históricas, conservando siempre los parámetros estadísticos básicos Figura 80. Los análisis se realizaron para las estaciones con participación en los ábacos y los resultados se presentan en la Tabla 23, Tabla 24 y Tabla 25:

Figura 80. Curvas Doble masa (izquierda) y registros reales frente a los simulados (derecha).

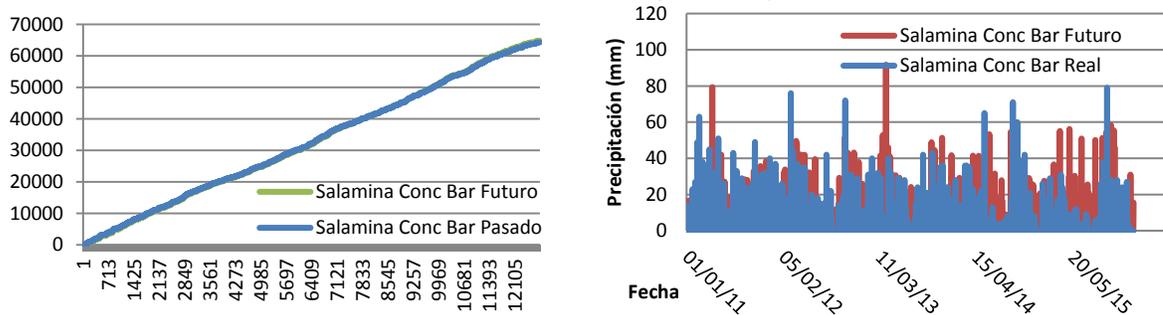


Tabla 23. Resultados del análisis futuro, Salamina.

Acueducto municipal	Salamina			
Registros oferta hídrica	Chagualito	Boquerón	El Uvito	Subtotal
CDC - Oferta hídrica total superficial				
Indicadores				
IRH	0.22	0.21	0.27	0.24
IA	0.15	0.15	0.11	0.13
Oferta hídrica total disponible (L/s)				
TR (años) Qd=0	1.3	1.3	1.2	1.3
Recesión Qmed-Q95% (días)	77	75	13	55

Acueducto municipal	Salamina			
	Registros oferta hídrica	Chagualito	Boquerón	El Uvito
Estadísticos				
QMED	90.7	44.9	331.3	155.6
QMIN	12.4	5.9	44.2	20.9
QMAX	774.7	399.7	1866.9	1013.8
DESV EST	71.6	36.5	207.1	105.1
VARIACION	5.1	1.3	42.9	16.4
CURTOSIS	5.4	5.7	3.7	5.0
RELACION QMAX-QMED	9	9	6	8
RELACION QMED-MIN	7	8	8	8
RELACION QMAX-QMIN	62	68	42	58
Tasa de cambio (%)				
Q97.5	5%	3%	54%	40%
Q95%	5%	3%	46%	34%
Q50%	-3%	-4%	-3%	-3%
Indicadores				
IRH	3%	2%	13%	6%
IA	6%	6%	2%	5%
Recesión (días)	-4%	-2%	-18%	-8%
Estadísticos				
QMED	-3%	-3%	-4%	-4%
QMIN	17%	14%	18%	18%
QMAX	0%	0%	1%	1%

Tabla 24. Resultados del análisis futuro, La Merced.

Acueducto municipal	La Merced			
	Registros oferta hídrica	La Isabel	El Rosario	Santana
CDC - Oferta hídrica total superficial				
Indicadores				
IRH	0.19	0.19	0.19	0.19
IA	0.22	0.22	0.23	0.22
Oferta hídrica total disponible (L/s)				
TR (años) Qd=0	1.8	1.6	1.7	1.7
Recesión Qmed-Q95% (días)	84	83	83	83

Acueducto municipal	La Merced			
	Registros oferta hídrica	La Isabel	El Rosario	Santana
Estadísticos				
QMED	12.6	7.4	11.5	10.5
QMIN	1.4	0.8	1.3	1.2
QMAX	141.4	84.2	131.7	119.1
DESV EST	11.7	7	10.8	9.8
VARIACION	0.1	0	0.1	0.1
CURTOSIS	8.9	9.1	9.4	9.1
RELACION QMAX-QMED	11	11	12	11
RELACION QMED-MIN	9	9	9	9
RELACION QMAX-QMIN	99	100	100	100
Comparativo pasado/futuro (%)				
Q97.5	-1%	-1%	0%	-1%
Q95%	0%	0%	0%	0%
Q50%	-2%	-2%	-2%	-2%
Indicadores				
IRH	0%	0%	0%	0%
IA	2%	2%	2%	2%
Recesión (días)	-1%	-1%	-1%	-1%
Estadísticos				
QMED	-2%	-1%	-1%	-1%
QMIN	0%	0%	0%	0%
QMAX	2%	2%	2%	2%

Tabla 25. Resultados del análisis futuro, Norcasia.

Acueducto municipal	Norcasia			
	Registros oferta hídrica	Las Pavas	Monte bello	La Virgen
CDC - Oferta hídrica total superficial				
Indicadores				
IRH	0.19	0.18	0.18	0.19
IA	0.09	0.09	0.09	0.09
Oferta hídrica total disponible (L/s)				
Q (L/s)	0.43	0	0	0.0
TR (años)	1.4	1.5	1.4	1.4
Recesión Qmed-Q95% (días)	37	41	41	40

Acueducto municipal	Norcasia			
	Las Pavas	Monte bello	La Virgen	Subtotal
Registros oferta hídrica				
Estadísticos				
QMED	24.3	25	6.3	18.5
QMIN	1.7	1.2	0.3	1.1
QMAX	167.1	179.5	45.3	130.6
DESV EST	21.1	22.6	5.7	16.5
VARIACION	0.4	0.5	0	0.3
CURTOSIS	4.0	4.1	4.1	4.1
RELACION QMAX-QMED	7	7	7	7
RELACION QMED-MIN	15	21	21	19
RELACION QMAX-QMIN	100	152	152	135
Comparativo pasado/futuro (%)				
Q97.5	50%	72%	72%	61%
Q95%	47%	64%	64%	56%
Q50%	-4%	-4%	-4%	-4%
Indicadores				
IRH	13%	14%	14%	14%
IA	-2%	-2%	-2%	-2%
Recesión (días)	-14%	-15%	-15%	-15%
Estadísticos				
QMED	-4%	-4%	-4%	-4%
QMIN	38%	99%	99%	61%
QMAX	-16%	-16%	-16%	-16%

El comparativo entre lo simulado y lo medido por las estaciones de precipitación sugieren compatibilidad en términos de magnitud y periodos secos haciendo claridad en que el objeto de las proyecciones de cambio climático no pretenden generar pronósticos sino generar escenarios para la gestión del agua. Referente al escenario simulado de cambio climático se tiene como resultado incremento en los caudales mínimos para Salamina y Norcasia del 18% y 61% respectivamente y sobre La Merced, las condiciones se mantienen. Lo anterior obedece a que la reducción en las precipitaciones implica mayores tiempos de respuesta en los caudales tal como lo evidencia el aumento en la regulación y retención hídrica para Salamina y Norcasia del 6% y 14% respectivamente, tal como se observa en la Tabla 23, Tabla 24 y Tabla 25.

No obstante la duración de la sequía toma mayor relevancia puesto que los días de recesión se reducen considerablemente y en términos porcentuales es equivalente al -8%, -1% y -15% para Salamina, La Merced y Norcasia, respectivamente, lo que equivale a una reducción para la recesión entre condiciones medias y mínimas a 55, 83 y 40 días respectivamente.

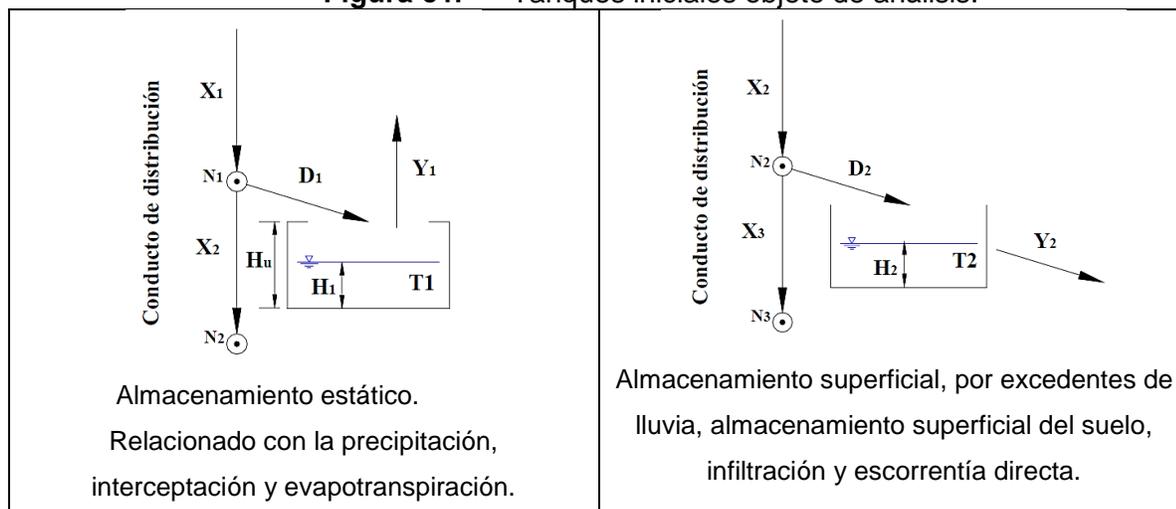
De otro lado se presentan cambios en los valores medios, máximos y mínimos entre los que destacan la reducción de caudales máximos del 16% para Norcasia debido a la reducción en las precipitaciones y a la respuesta particular del área abastecedora, un incremento en los caudales mínimos del 18% y 61% para Salamina y Norcasia respectivamente, y una ligera reducción en general sobre caudales medios que varía entre el 1% y el 4%.

Finalmente es importante destacar la alta incertidumbre que tienen las series de los escenarios futuros producto de la modelación y el downscaling utilizado, así como la incertidumbre que implica el uso de un modelo hidrológico agregado como representación de algunos componentes del ciclo del agua. Se puede concluir que los escenarios de cambio climático son útiles para el análisis de condiciones medias, sin embargo para condiciones extremas deben ser considerados con mucha precaución.

5.3 Análisis de sensibilidad para la Gestión Integral del Recurso Hídrico

5.3.1 Simulación hidrológica escenarios deseados

El presente análisis se concentra en las propiedades de los suelos y la cobertura vegetal en función de los parámetros utilizados por el modelo, comprendiendo los límites permisibles que físicamente pueden presentarse. A continuación se presenta el esquema de los componentes del modelo hidrológico analizados (Figura 81):

Figura 81. Tanques iniciales objeto de análisis.

Fuente: (Vélez, 2001), (Francés, Vélez U, & Vélez U, 2007).

Un análisis realizado sobre los parámetros de calibración máximos y mínimos recomendados para el modelo (Vélez, 2001) permitió identificar la sensibilidad y relevancia de las variables Almacenamiento Capilar, exponente de infiltración para caudales medios y máximos, así como los exponentes de infiltración y evaporación para caudales mínimos, lo cual permitió mayor entendimiento del modelo. Los resultados en uno de ellos se presentan en la Tabla 26, Tabla 27, Tabla 28 y Tabla 29:

Tabla 26. Parámetros de calibración máximos y mínimos recomendados.

Escenarios	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Parámetro	Calibración	Almacenamiento Máximo Capilar	Almacenamiento Capilar	Almacenamiento Capilar	Almacenamiento Agua Superficial	Almacenamiento Agua Superficial	Exponente Infiltración	Exponente Infiltración	Exponente Evaporación	Exponente Evaporación	Exponente Evaporación
Valor	NA	20	600	0	600	3,99	10	1	3	0,2	1

Tabla 27. Resultados medios de los parámetros objeto de análisis de sensibilidad.

Escenario	Caudal m ³ /s	ETR (mm)	Escorrentía (mm)	Interflujo (mm)	Flujo base (mm)
1	0,093	1,95	1,43	1,44	0,52
2	0,099	1,74	1,89	1,28	0,46
3	0,092	1,96	1,39	1,44	0,53
4	0,092	1,94	1,42	1,43	0,52
5	0,093	1,96	1,43	1,44	0,52
6	0,093	1,95	1,43	1,44	0,52
7	0,093	1,95	1,43	1,44	0,52
8	0,097	1,79	1,53	1,49	0,53
9	0,091	2,02	1,40	1,41	0,52
10	0,089	2,10	1,33	1,40	0,52
11	0,098	1,77	1,56	1,49	0,53

Tabla 28. Resultados máximos de los parámetros objeto de análisis de sensibilidad.

Escenario	Caudal m ³ /s	ETR (mm)	Escorrentía (mm)	Interflujo (mm)	Flujo base (mm)
1	0,771	3,42	24,44	4,22	1,09
2	1,720	3,33	61,25	4,20	1,09
3	0,701	3,52	21,90	4,21	1,09
4	0,771	3,42	24,44	4,22	1,09
5	0,771	3,42	24,44	4,22	1,09
6	0,771	3,42	24,44	4,22	1,09
7	0,771	3,42	24,44	4,22	1,09
8	0,740	3,16	23,27	4,22	1,09
9	0,813	3,53	25,98	4,22	1,09
10	0,746	3,74	23,59	4,21	1,09
11	0,799	3,14	25,40	4,23	1,09

Tabla 29. Resultados mínimos de los parámetros objeto de análisis de sensibilidad.

Escenario	Caudal m ³ /s	ETR (mm)	Escorrentía (mm)	Interflujo (mm)	Flujo base (mm)
1	0,0106	1,07	0,00	0,00	0,37
2	0,0083	0,00	0,00	0,00	0,29
3	0,0109	0,99	0,00	0,00	0,38
4	0,0106	0,08	0,00	0,00	0,37
5	0,0106	1,07	0,00	0,00	0,37
6	0,0106	1,07	0,00	0,00	0,37
7	0,0106	1,07	0,00	0,00	0,37
8	0,0111	0,96	0,00	0,00	0,38
9	0,0104	1,11	0,00	0,00	0,36
10	0,0104	1,22	0,00	0,00	0,36
11	0,0109	0,88	0,00	0,00	0,38

5.3.2 Análisis de sensibilidad referente a coberturas vegetales

Existe una limitante en cuanto al proceso físico relacionado con la retención de humedad y lo que se pretende es simular la presencia de la mejor cobertura vegetal en términos hídricos para representar los efectos en términos del régimen hidrológico. La variable objeto de análisis es la evapotranspiración puesto que es el proceso más influyente en el componente del ciclo hidrológico asociado, es decir, el almacenamiento estático. Sobre la superficie de la tierra se presentan menores temperaturas con la presencia de bosques frente a la existencia de cultivos o pastos, lo que además promueve aumento en la humedad relativa, reducción en la evaporación (con aumento en la transpiración), condiciones que se simulan.

5.3.3 Análisis de sensibilidad referente a uso del suelo

Se busca simular el mejoramiento de la capacidad de retener y/o almacenar agua por parte del suelo. Es un absurdo pretender sustituir un suelo de baja capacidad de retención y/o almacenamiento por uno de buenas condiciones como ocurre con las coberturas vegetales. Sin embargo algunas prácticas sobre el uso de los suelos puede mejorar o reducir la cantidad de agua disponible para el almacenamiento. En otras palabras, mientras algunas prácticas agropecuarias promueven la compactación superficial de los suelos que a su vez derivan en la reducción de la capacidad de infiltración al reducir la densidad y por tanto porosidad de los suelos, contar con coberturas vegetales tales como rastrojo o bosque generan una predisposición del suelo al encharcamiento y a la infiltración por medio del material orgánico en descomposición. Los resultados se presentan en la Tabla 30:

Tabla 30. Resultados análisis de sensibilidad.

Análisis de sensibilidad	Chagualito	Boquerón	El Uvito	La Isabel	El Rosario	Santana	Las Pavas	Monte bello	La Virgen
Coberturas vegetales									
Bosque	37%	15%	26%	99%	33%	5%	1%	40%	0%
Pastos	53%	81%	74%	1%	55%	51%	0%	60%	2%
Agrícola	10%	5%	0%	0%	12%	44%	99%	0%	98%
Por cobertura vegetal									
Exponente Evaporación	16%	24%	21%	0%	17%	20%	12%	17%	13%
Almacenamiento Capilar (Hu)	47%	66%	59%	1%	49%	58%	40%	48%	41%
Almacenamiento Máximo Capilar	47%	66%	59%	1%	49%	58%	40%	48%	41%
Por uso del suelo									
Exponente Infiltración	-16%	-24%	-21%	0%	-17%	-20%	-12%	-17%	-13%
Almacenamiento Agua Superficial	47%	66%	59%	1%	49%	58%	40%	48%	41%
Resultados en términos porcentuales									
IRH actual	0.21	0.21	0.24	0.19	0.19	0.19	0.17	0.16	0.16
IRH simulado	0.23	0.22	0.25	0.19	0.21	0.21	0.18	0.17	0.17
Diferencia % Q50CDC	5%	8%	4%	0%	13%	15%	3%	4%	3%
Diferencia % Q75CDC	8%	11%	8%	0%	18%	21%	5%	7%	6%
Diferencia % Q95CDC	9%	12%	9%	0%	15%	18%	6%	7%	6%

Análisis de sensibilidad	Chagualito	Boquerón	El Uvito	La Isabel	El Rosario	Santana	Las Pavas	Monte bello	La Virgen
Q máx.	-6%	-8%	-1%	0%	-8%	-9%	-1%	-2%	-1%
Q med.	3%	3%	2%	0%	6%	7%	1%	1%	1%
Q min	4%	5%	4%	0%	6%	7%	6%	0%	0%
Escorrentía máx.	-7%	-9%	-2%	0%	-10%	-11%	-1%	-2%	-1%
Escorrentía med	4%	4%	2%	0%	7%	9%	1%	1%	1%
Escorrentía min	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	-2%	0%
Interflujo máx.	3%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Interflujo med	0%	3%	1%	0%	6%	7%	1%	1%	0%
Interflujo min	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Flujo base máx.	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Flujo base med	1%	1%	1%	0%	1%	2%	1%	0%	0%
Flujo base min	2%	3%	1%	0%	3%	4%	1%	0%	0%

El análisis de sensibilidad de las variables objeto de gestión arroja como resultado que con el cambio de coberturas vegetales se pueden esperar diferentes efectos de acuerdo al estado actual de las mismas, es decir, si un área abastecedora cuenta con grandes áreas en rastrojos o bosques, los efectos serán despreciables a diferencia de un área abastecedora donde las coberturas vegetales y usos del suelo se relacionen con actividades pecuarias o agrícolas. Para Salamina el área de mayor impacto es Boquerón, puesto que el cambio en uso del suelo representa un aumento del 66% en el almacenamiento capilar y superficial sumado a una reducción por evaporación del 24%, obteniendo incrementos en el caudal mínimo del 5% y reducción en el caudal máximo del 8%. Para La Merced el área de mayor impacto es Santana, puesto que el cambio en el uso del suelo representa un aumento del 58% en almacenamientos capilar y superficial sumado a una reducción en la evaporación del 20%, obteniendo incrementos en el caudal mínimo del 7% y reducción en el caudal máximo del 9%. Para Norcasia no se presentan diferencias representativas en caudales máximos y mínimos a pesar de simular un incremento en el almacenamiento capilar y superficial del 48% y reducción en la evaporación del 17%, producto de las condiciones climáticas que determinan el régimen hidrológico en la zona. A pesar de lo anterior, los incrementos en los flujos mínimos oscilan entre el 1% y el 4% que en términos del abastecimiento puede representar poco frente al esfuerzo por mejorar las coberturas vegetales en un área abastecedora.

5.4 Análisis de Incertidumbre

La incertidumbre está inmersa en el uso de información climática por parte de diferentes modelos. No obstante a través de diferentes técnicas y pruebas es posible establecer el grado de incertidumbre de los resultados obtenidos. A continuación el análisis realizado:

5.4.1 Incertidumbre espacial y temporal en información climática

La información climática es objeto de pruebas de homogeneidad y consistencia que permiten inicialmente descartar datos anómalos para posteriormente evaluar el comportamiento climático regional con la ayuda de las curvas doble masa, prueba en la cual se obtuvo buenos resultados ($R^2 > 95\%$). Para complementar los registros de precipitación en tierra, se utilizó información satelital. Los datos de precipitación ponderada se graficaron y se contrastaron con las series de caudal observado para identificar anomalías en los registros que busque reducir la incertidumbre de la información. Otro factor que reduce la incertidumbre es la escala temporal utilizada, puesto que la información diaria contiene mayor resolución hidrológica que la información mensual e identifica de mejor manera los eventos mínimos y máximos extremos de tanto interés. Respecto a las series usadas de cambio climático es necesario reconocer la incertidumbre que implica el escalamiento espacial de los modelos globales y que para eventos extremos no ofrece la resolución suficiente que permitan representar el efecto acentuado en series futuras, lo cual fue considerado como limitante; el periodo 2010-2015 no considerado en las simulaciones fue utilizado para comparar la información modelada a futuro frente a lo que realmente se presentó, con buenos resultados.

5.4.2 Incertidumbre en la modelación hidrológica

El proceso de calibración y validación contó con el apoyo de los índices MAE; RSME, NASH y RSR y la conclusión inicial es que el modelo tuvo un desempeño No satisfactorio a la luz de la simulación continua. No obstante al evaluar el régimen de caudales medio y mínimo sobre la estación Costa Azul, se obtuvo buenos resultados entre los que destaca el índice Nash de 0,86 y 0,99 respectivamente, en consecuencia los resultados obtenidos sobre la curva de duración de caudales reduce considerablemente la incertidumbre asociada a la modelación hidrológica. Un factor no considerado con relación a la incertidumbre es el efecto de escala espacial, puesto que las series de caudales

observados corresponden a áreas aferentes superiores a 100 km², mientras que las áreas abastecedoras, en donde no se cuenta con suficientes registros, las áreas son inferiores a 6 km². Tal efecto ha sido evaluado en la cuenca del río Chinchiná y los parámetros utilizados en el presente estudio, que corresponden a los parámetros usados en tal cuenca, promueven la regionalización como metodología para generalizar respuestas hidrológicas. Finalmente se grafican los caudales simulados frente a la precipitación asociada al ábaco para validar la respuesta hidrológica con base en la relación directa existente entre ambas variables.

5.4.3 Incertidumbre en resultados obtenidos

Buscando reducir la incertidumbre de los resultados a partir de una comprensión amplia del modelo hidrológico, se propuso el análisis de sensibilidad. Tal análisis permitió identificar los procesos y variables de mayor relevancia y centrar los esfuerzos en la rigurosidad de tal información para reducir la incertidumbre. De otro lado la incertidumbre asociada a la recesión se disminuyó en la medida que las curvas ofrecieron tendencias claras que permitieron capturar tal comportamiento a través de ecuaciones matemáticas con buenos ajustes. El hecho de considerar tres escenarios de simulación permite reducir un poco más la incertidumbre puesto que los resultados considerados logran comprender las características principales de la sequía hidrológica relevantes para el abastecimiento tales como magnitud, frecuencia y duración.

Por otra parte y con relación a la variabilidad climática el estudio fue asertivo en cuanto a que los caudales mínimos simulados correspondían a eventos cálidos ENSO intensos y establece tal característica climática como la causa más relevante del déficit hídrico. El modo más efectivo para reducir la incertidumbre asociada a los caudales simulados en los ábacos es el monitoreo hidrométrico en cada punto de captación que permita una calibración particular de las condiciones aferentes. Finalmente el análisis probabilístico permite mejorar la comprensión de los caudales mínimos y reducir el desconocimiento del régimen de caudales como insumo fundamental en el abastecimiento de los acueductos municipales de Caldas.

6 Conclusiones, recomendaciones y trabajos futuros

6.1 Conclusiones

- Los resultados han permitido identificar la amenaza por déficit hídrico a partir de características modeladas para caudales ofertados y disponibles, condiciones del régimen hídrico, tiempo de recesión entre un caudal medio y un caudal mínimo, análisis probabilístico de caudales mínimos, caracterización de las sequías en términos de probabilidad, duración e intensidad, balance entre oferta y demanda, estimación de indicadores de vulnerabilidad al desabastecimiento y frente a eventos torrenciales, así como el comparativo bajo un escenario desfavorable de cambio climático y finalmente el análisis de sensibilidad asociado a simulaciones por cambios en la cobertura vegetal y uso del suelo.

- La regulación hídrica no sólo depende de las condiciones físicas de las áreas aferentes sino que depende en gran medida de las condiciones climáticas.

- La característica relevante frente a un evento de sequía en los casos de estudio es la duración. Ella refleja los efectos acumulados a lo largo del tiempo y genera mayores impactos sobre el abastecimiento en general.

- Los primeros resultados permiten identificar relaciones entre caudal máximo y caudal medio entre 5 y 11, entre caudal medio y mínimo entre 9 y 44, y entre caudal máximo y caudal mínimo entre 49 y 362; por tanto se presenta gran fluctuación en la magnitud de los caudales.

- De otro lado es importante reconocer que el análisis integrado de áreas abastecedoras por municipio consigue sumar los caudales de las fuentes que abastecen las cabeceras urbanas de los municipios objeto de estudio. Los resultados para Salamina indican que mientras las fuentes abastecedoras sean Chagualito y Boquerón, se tendrá desabastecimiento en épocas de estiaje asociado al conflicto con el caudal ambiental estimado durante el 83.09% del tiempo. Para La Merced se obtuvo desabastecimiento durante el 48.41% del tiempo mientras para Norcasia se obtuvo desabastecimiento durante un 56.04% del tiempo.
- Existe una evidente necesidad producto de la recurrencia de los eventos de sequía de acudir a fuentes alternas, proyectar planes de contingencia bajo el contexto concebido en el presente estudio y/o adelantar acciones que busquen regular la oferta hídrica de una corriente con infraestructura ambiental, lo cual requerirá ejercicios para cuantificar las intervenciones necesarias.
- El caudal propuesto por las guías técnicas para la valoración de la suficiencia hídrica de una fuente plantea el Q95% de permanencia. El caudal integrado obtenido tiene un periodo de retorno igual a 1.32 años para Salamina, 1.69 años para La Merced y 1.43 años para Norcasia, reflejando la recurrencia de la sequía y evidenciando la necesidad de estudio del régimen hídrico de las fuentes objeto de abastecimiento en términos de amenaza.
- Las dificultades técnicas en Salamina pueden verse solventadas con intervenciones más eficaces a partir de infraestructura ambiental o intervenciones en áreas abastecedoras que permitan mejorar la suficiencia hídrica y reducir la amenaza por déficit hídrico, mientras que en los municipios de La Merced y Norcasia se requiere de intervenciones más estructurales.
- La vulnerabilidad por desabastecimiento hídrico no solo depende de la suficiencia en términos de oferta hídrica sino en la reducción de la demanda, optimizando consumos, reduciendo pérdidas y adoptando las medidas establecidas en la Ley 373 de 1997.

-
- La incorporación de Cambio Climático no busca pronosticar el comportamiento futuro de las fuentes hídricas sino que busca dar robustez a los análisis realizados, simulando un posible escenario y estableciendo efectos e impactos en el abastecimiento de los acueductos objeto de estudio. Es importante considerar las incertidumbres que representa el downscaling para eventos extremos.
 - En cuanto a los umbrales para alerta temprana por sequía meteorológica se establecieron alrededor de 81 días sin lluvia para Salamina, 85 días para La Merced y 69 días para Norcasia con alerta roja relacionada con desabastecimiento. Para alerta amarilla se plantea un valor correspondiente al 50% y para alerta naranja el valor del 75% de los días estimados en alerta roja.
 - Aunque la modelación hidrológica presenta sus limitaciones y restricciones para simular coberturas vegetales y usos del suelo, el análisis de sensibilidad de diferentes parámetros indican que los procesos de reforestación no serían suficientes para contar con mayor disponibilidad hídrica en los acueductos objeto de análisis y será necesario recurrir a otras técnicas en función del abastecimiento requerido.
 - La modelación hidrológica en zonas que no cuentan con registros históricos supone cierto grado de incertidumbre, el cual se puede reducir en la medida que las entidades competentes lleven a cabo el monitoreo exhaustivo sobre los caudales objeto de aprovechamiento.
 - Sigue siendo fundamental la articulación entre las autoridades ambientales, entes territoriales, entidades prestadoras del servicio de acueducto y la academia, de tal forma que su labor articulada permita contar con un horizonte claro acorde a las funciones misionales de cada entidad.
 - El presente estudio propone una metodología novedosa que permite generar conocimiento relacionado con la sequía y el déficit hídrico de tal forma que se pueda romper el ciclo hidro-ilógico.

- Se destaca que se lograron desarrollar los tres objetivos específicos, permitiendo establecer una metodología para el análisis de abastecimiento a través de la estimación del déficit hídrico.

6.2 Recomendaciones

- El presente estudio tiene una finalidad académica y su grado de incertidumbre producto de la información secundaria utilizada, la incertidumbre propia de los modelos hidrológicos como representación de algunos procesos del ciclo del agua y finalmente el alto coeficiente de variación relacionado con las grandes fluctuaciones hídricas de la región; por tanto se recomienda sea tomado como referencia en términos de gestión sobre los casos de estudio.
- Visibilizar la sequía como una oscilación climática recurrente y que genera impactos relevantes sobre las poblaciones.
- Dar vida al modelo, es decir, que sea permanentemente utilizado y permita simular eventos extremos, fenómenos no detectables y diferentes escenarios de cambio climático, actualizando la metodología utilizada con datos climáticos recientes.
- Promover acciones basadas en el conocimiento para los respectivos análisis en términos de gestión y planificación hídrica.

6.3 Trabajos futuros

- Los principales trabajos futuros consisten en la actualización de los modelos utilizados con información climática actualizada para una permanente calibración y validación de los parámetros establecidos en cada modelo hidrológico. Así mismo será relevante la simulación de un mayor número de escenarios futuros con base en eventos extremos representados por series sintéticas.

-
- De otro lado la sequía cuenta con diferentes índices e indicadores que valdría la pena ser estimados para realizar una comparación de resultados.
 - La aplicación de la metodología para el SPEI puede hacerse de manera homóloga sobre flujos de escorrentía, interflujo y flujo base para caracterizar la sequía hidrológica, así como sobre el almacenamiento superficial y el contenido de humedad en los suelos para caracterizar la sequía agrícola. La información estaría disponible como un subproducto del modelo utilizado con grandes bondades en los resultados asociados al régimen e integralidad en procesos del ciclo hidrológico. Otros índices que pueden ser estimados son el Índice Estandarizado de Humedad en los Suelos e Índice Estandarizado de Caudales.
 - Implementar el monitoreo hidroclimatológico en las áreas abastecedoras que permitan reducir la incertidumbre con el uso de información que represente directamente las condiciones climáticas y las fluctuaciones de caudal.
 - Establecer intervalos de confianza sobre el análisis probabilístico y establecer el grado de incertidumbre de las simulaciones con mayor información primaria.
 - Evaluación de otros acueductos municipales y veredales en Caldas para definir las condiciones de abastecimiento de las comunidades.
 - La sequía del periodo 2015-2016 contó con el levantamiento de gran información que podrá ser utilizada en el estudio de la sequía y sus efectos e impactos.

A. Anexo: Índices e indicadores para la sequía

Tabla 31. Índices e indicadores meteorológicos.

Meteorología	Sigla	Facilidad de uso	Parámetros de entrada	Información adicional
Aridity Anomaly Index	AAI		P, T, PET, ET	Operativamente disponible en India
Deciles			P	fácil cálculo; usado en Australia
Keetch-Byram Drought Index	KBDI		P, T	Cálculos basados en el clima del área de interés
Percent of Normal Precipitation			P	Cálculos simples
Standardized Precipitation Index	SPI		P	Punto de partida para el monitoreo de la sequía meteorológica
Weighted Anomaly Standardized Precipitation	WASP		P, T	Utiliza datos en grilla para el monitoreo de sequía en regiones tropicales
Aridity Index	AI		P, T	Puede también usarse para clasificaciones del clima
China Z Index	CZI		P	Destinado a mejorar los datos del SPI
Crop Moisture Index	CMI		P, T	Requiere valores semanales
Drought Área Index	DAI		P	Indica del desempeño de la temporada de monzón
Drought Reconnaissance Index	DRI		P, T	Precipitación y temperatura mensual requeridas
Effective Drought Index	EDI		P	Programa disponible mediante el contacto directo con el origen
Hydro-thermal Coefficient of Selyaninov	HTC		P, T	Cálculos fáciles y muchos ejemplos en la federación Rusa
NOAA Drought Index	NDI		P	Mejor uso con aplicaciones agrícolas
Palmer Drought Severity Index	PDSI		P, T, AWC	Cálculos complejos y es necesario datos completos
Palmer Z Index			P, T, AWC	Una de las salidas del PDSI
Rainfall Anomaly Index	RAI		P	Requiere seriamente datos completos
Self Calibrated Palmer Drought Severity Index	sc-PDSI		P, T, AWC	Cálculos complejos y es necesario datos completos
Standardized Anomaly Index	SAI		P	Datos puntuales usados para describir las condiciones regionales
Standardized Precipitation Evapotranspiration Index	SPEI		P, T	Requiere seriamente datos completos. Salida similar al SPI pero con un componente de temperatura
Agricultural Reference Index for Drought	ARID		P, T, Mod	Producido en el sureste de USA no verificado ampliamente en otras regiones externas
Crop-specific Drought Index	CSDI		P, T, Td, W, Rad, AWC, Mod, CD	Cantidad y calidad de datos necesarios, haciendo complejo su uso
Reclamation Drought Index	RDI		P, T, S, RD, SF	Similar al Índice de suministro de agua superficial pero contiene un componente de temperatura

Tabla 32. Índices e indicadores de humedad del suelo.

Humedad del suelo	Sigla	Facilidad de uso	Parámetros de entrada	Información adicional
Soil Moisture Anomaly	SMA		P, T, AWC	Intenta mejorar el balance hídrico del PDSI
Evapotranspiration Déficit Index	ETDI		Mod	Requiere cálculos complejos con múltiples entradas
Soil Moisture Déficit Index	SMDI		Mod	Cálculos semanales a diferentes profundidades del suelo. Cálculos complejos
Soil Water Storage	SWS		AWC, RD, ST, SWD	Debido a variaciones de tipos de cultivo y suelo, la interpolación sobre extensiones de áreas es un desafío

Tabla 33. Índices e indicadores por hidrología.

Hidrología	Sigla	Facilidad de uso	Parámetros de entrada	Información adicional
Palmer Hydrological Drought Severity Index	PHDI		P, T, AWC	Requiere seriamente datos completos
Standardized Reservoir Supply Index	SRSI		RD	Cálculos similares al SPI usando datos del reservorio
Standardized Streamflow Index	SSFI		SF	Usa el programa del SPI junto con datos del flujo
Standardized Water-level Index	SWI		GW	Cálculos similares al SPI pero usa niveles de agua subterránea o de pozos en lugar de la precipitación
Streamflow Drought Index	SDI		SF	Cálculos similares al SPI pero usa datos del flujo en lugar de la precipitación
Surface Water Supply Index	SWSI		P, RD, SF, S	Algunas metodologías y productos derivados están disponibles, pero las comparaciones entre cuencas son subjetivas dependiendo del método escogido
Aggregate Dryness Index	ADI		P, ET, SF, RD, AWC, S	no codificado pero su matemática es explicada en la literatura
Standardized Snowmelt and Rain Index	SMRI		P, T, SF, Mod	Puede ser usado con o sin el paquete de nieve

Tabla 34. Índices e indicadores por sensores remotos.

Sensores Remotos	Sigla	Facilidad de uso	Parámetros de entrada	Información adicional
Enhanced Vegetation Index	EVI		Sat	No separa el estrés por sequía de otros estrés
Evaporative Stress Index	ESI		Sat, PET	No tiene historial como producto operativo
Normalized Difference Vegetation Index	NDVI		Sat	Calculado para muchas ubicaciones
Temperature Condition Index	TCI		Sat	Usualmente encontrado a lo largo de los cálculos del NDVI
Vegetation Condition Index	VCI		Sat	Usualmente encontrado a lo largo de los cálculos del NDVI
Vegetation Drought Response Index	VegDRI		Sat, P, T, AWC, LC, ER	Toma en cuenta muchas variables para separar el estrés de sequía de otro estrés de vegetación
Vegetation Health Index	VHI		Sat	Uno de los primeros intentos de monitorear la sequía utilizando datos de detección remota
Water Requirement Satisfation Index	WRSI		Sat, Mod, CC	Operativo para muchas ubicaciones
Normalized Difference Water Index and Land Surface Water Index	NDVWI – LSWI		Sat	Producido operativamente usando datos de espectroscopometría de imagen de resolución moderada
Soil adjusted Vegetation Index	SAVI		Sat	No se produce operativamente

Tabla 35. Índices e indicadores compuestos o modelados.

Compuestos o modelados	Sigla	Facilidad de uso	Parámetros de entrada	Información adicional
Combined Drought Indicator	CDI		Mod, P, Sat	Utiliza datos de superficie y de detección remota
Global Integrated Drought Monitoring and Prediction System	GIDmaP S		Multiple, Mod	Producto operacional con salida global para tres índices de sequía: Índice de humedad de suelo normalizado, SPI y índice de sequía estandarizada multivariable
Global Land Data Assimilation System	GLDAS		Multiple, Mod, Sat	Útil en regiones con datos escasos debido a la extensión global
Multivariate Standardized Drought Index	MSDI		Multiple, Mod	Disponible pero es necesaria la interpretación
United States Drought Monitor	USDM		Multiple	Disponible pero es necesaria la interpretación

Fuente: (WMO & GWP, 2016)

Convenciones:

AWC = contenido de agua disponible, CC = coeficiente de cultivo, CD = datos de cultivo, ER = ecorregión, ET = evapotranspiración, GW = agua subterránea, LC = cobertura del suelo, Mod = modelado, Múltiples = múltiples indicadores utilizados, P = precipitación,	PET = evapotranspiración potencial, Rad = radiación solar, RD = reservorio, S = capa de nieve, Sat = satélite, SF = caudal de corriente, ST = tipo de suelo, SWD = déficit hídrico del suelo, T = temperatura, Td = temperatura del punto de rocío, W = datos del viento.
--	---

Fuente: (WMO & GWP, 2016)

B. Anexo estaciones de precipitación, temperatura, humedad relativa, brillo solar y caudal

Tabla 36. Estaciones de precipitación.

Estación	Entidad	Municipio	Departamento	Altura	Lat.	Long.	Reg. Des.	Reg. Has.	Faltantes
Abejorral	IDEAM	Abejorral	Antioquia	2190	5.78	-75.42	3/6/70	6/7/12	0%
Aeropuerto La Nubia	IDEAM	Manizales	Caldas	2058	5.03	-75.47	1/1/68	31/10/14	3%
Aeropuerto Matecana	IDEAM	Pereira	Risaralda	1342	4.8	-75.73	3/9/47	13/6/12	0%
Aeropuerto Santágueda	IDEAM	Palestina	Caldas	933	5.08	-75.68	1/9/49	30/9/89	37%
Agronomía	Cenicafé	Manizales	Caldas	2088	5.06	-75.5	1/1/56	31/12/14	2%
Aguadas	IDEAM	Aguadas	Caldas	2071	5.6	-75.45	1/8/70	31/8/15	3%
Albania	IDEAM	Mariquita	Tolima	500	5.28	-74.9	1/5/87	25/5/12	6%
Almacafé letras	Cenicafé	Manizales	Caldas	3684	5.05	-75.33	1/5/00	31/12/14	2%
Almacafé Vivero	Cenicafé	Quimbaya	Quindío	1330	4.62	-75.77	1/11/51	31/12/14	3%
Alto del Oso	IDEAM	Murillo	Tolima	3150	4.85	-75.25	12/3/86	23/2/12	0%
Arauca	IDEAM	Palestina	Caldas	890	5.11	-75.7	24/2/62	30/5/12	0%
Bariloche	Cenicafé	Fredonia	Antioquia	1748	5.92	-75.7	1/1/80	31/12/14	2%
Bellavista	IDEAM	Anserma	Caldas	1932	5.27	-75.8	21/9/63	31/10/15	25%
Bocatoma Campoalegre	CHEC	Chinchiná	Caldas	1470	4.93	-75.63	12/8/60	30/9/12	5%
Bolivia	GENSA	Pensilvania	Caldas	1750	5.33	-75.12	1/1/64	31/10/02	3%
Buenos Aires	Cenicafé	Guatica	Risaralda	1814	5.31	-75.8	1/1/81	30/11/13	3%
Cañaveral GENSA	GENSA - ISAGEN	Victoria	Caldas	1100	5.32	-74.94	1/6/68	3/5/14	21%
Cañaveral IDEAM	IDEAM	Victoria	Caldas	920	5.32	-74.93	11/8/74	30/9/14	2%
Carimagua	Cenicafé	Amaga	Antioquia	1802	6.02	-75.68	1/3/97	30/11/12	9%
Cenicafé	Cenicafé	Chinchiná	Caldas	1310	5	-75.6	1/1/51	31/12/14	0%
Claro de Luna	IDEAM	Sonson	Antioquia	180	5.85	-74.77	1/5/88	31/5/11	11%
Cocorná	Cenicafé	Cocorná	Antioquia	1344	6.06	-75.19	1/1/97	31/12/14	0%
Combia	Cenicafé	Pereira	Risaralda	1173	4.84	-75.78	1/1/81	31/10/14	3%
Cuatro Esquinas	Cenicafé	Aguadas	Caldas	1900	5.67	-75.42	6/9/83	31/12/14	6%
Cuba	Cenicafé	Victoria	Caldas	1054	5.33	-74.93	1/3/89	30/9/14	13%
El Barranco	Cenicafé	Mistrató	Risaralda	1580	5.33	-75.88	8/10/87	31/12/14	2%
El Bosque	Cenicafé	Dosquebradas	Risaralda	1458	4.84	-75.68	1/5/78	31/12/10	4%
El Cedral	Cenicafé	Pereira	Risaralda	2120	4.7	-75.53	1/1/61	31/12/14	9%
El Cedral Sabinas	CHEC	Manizales	Caldas	1338	5.03	-75.42	19/10/95	30/9/12	6%
El Chispero Lago Camaguadua	CHEC	Chinchiná	Caldas	1400	5	-75.62	24/2/90	31/10/12	4%
El Descanso	Cenicafé	Marmato	Caldas	1803	5.5	-75.61	13/10/80	31/1/13	7%
El Diamante	Cenicafé	Quinchia	Risaralda	1550	5.32	-75.7	1/1/81	31/12/14	4%
El Edén IDEAM	IDEAM	Fresno	Tolima	1350	5.15	-75.03	5/6/58	30/4/12	4%
El Inciensial	Cenicafé	Murillo	Tolima	2400	4.88	-75.13	1/6/88	31/3/12	2%
El Jazmín	Cenicafé	Santa Rosa de Cabal	Risaralda	1635	4.91	-75.62	26/7/60	31/12/14	0%
El Mirador	Cenicafé	Filadelfia	Caldas	1650	5.23	-75.57	1/8/93	31/12/14	2%
El Recreo	Cenicafé	Palestina	Caldas	1430	5.04	-75.65	1/1/70	31/12/14	6%
El Recuerdo	IDEAM	Marsella	Risaralda	1560	4.96	-75.74	9/9/70	1/6/11	0%
El Rosario	Cenicafé	Venecia	Antioquia	1635	5.96	-75.71	1/1/67	31/12/14	0%
El Trapiche	Cenicafé	Bolívar	Antioquia	1277	5.8	-76.01	14/11/96	29/2/12	1%
El Vergel	GENSA - ISAGEN	Norcasia	Caldas	507	5.57	-74.88	1/1/80	3/5/14	1%
Florencia GENSA	GENSA - ISAGEN	Samaná	Caldas	1535	5.52	-75.03	15/5/78	3/5/14	23%

Estación	Entidad	Municipio	Departamento	Altura	Lat.	Long.	Reg. Des.	Reg. Has.	Faltantes
Florencia IDEAM	IDEAM	Samaná	Caldas	1575	5.53	-75.05	1/1/78	31/7/95	50%
Granja Kennedy	Cenicafé	Pensilvania	Caldas	1900	5.33	-75.1	1/7/93	31/12/14	34%
Granja Luker	Cenicafé	Palestina	Caldas	1031	5.07	-75.68	1/1/64	31/12/14	0%
Guaymaral	Cenicafé	Aguadas	Caldas	1600	5.65	-75.45	1/10/61	31/12/14	2%
Guerrrito	IDEAM	Quinchia	Risaralda	810	5.28	-75.66	18/10/78	31/12/11	0%
Hogar Juvenil	Cenicafé	Pensilvania	Caldas	1560	5.5	-75.18	1/7/89	31/12/14	2%
IDEAM Dorada	IDEAM	La Dorada	Caldas	270	5.47	-74.67	1/7/64	30/9/15	12%
IDEAM Honda	IDEAM	Honda	Tolima	196	5.2	-74.73	27/8/64	30/5/12	9%
Insula	CHEC	Chinchiná	Caldas	1225	5	-75.65	18/9/60	31/10/12	4%
Java	Cenicafé	Manizales	Caldas	1778	5.01	-75.54	1/10/80	31/12/14	3%
La Argentina Riosucio	Cenicafé	Riosucio	Caldas	1420	5.47	-75.7	1/1/86	31/12/14	2%
La Argentina Palestina	Cenicafé	Palestina	Caldas	1354	5.03	-75.68	1/4/78	30/1/15	1%
La Bella	Cenicafé	Calarcá	Quindío	1449	4.5	-75.67	1/1/51	31/12/14	0%
La Blanquita	Cenicafé	Fredonia	Antioquia	570	5.82	-75.68	17/1/84	31/12/14	3%
La Cascada	Cenicafé	Pacora	Caldas	1600	5.47	-75.55	1/7/83	31/12/14	31%
La Catalina	Cenicafé	Pereira	Risaralda	1321	4.75	-75.74	1/1/86	31/12/14	0%
La Cristalina Cenicafé	Cenicafé	Támesis	Antioquia	775	5.71	-75.67	1/1/96	31/12/14	5%
La Cristalina IDEAM	IDEAM	Neira	Caldas	2290	5.19	-75.43	22/9/70	30/9/15	4%
La Divisa	Cenicafé	Chinchiná	Caldas	1590	4.98	-75.6	1/5/92	31/12/14	0%
La Esperanza filandia	Cenicafé	Filandia	Quindío	1671	4.64	-75.69	1/2/88	31/12/14	1%
La Esperanza	IDEAM	Manizales	Caldas	3280	5.02	-75.36	4/10/70	30/11/14	2%
La Esperanza Honda	IDEAM	Honda	Tolima	222	5.26	-74.73	1/1/71	31/1/12	3%
La Francia	Cenicafé	Chinchiná	Caldas	1335	4.97	-75.65	1/1/77	31/12/14	19%
La Juliana	Cenicafé	Manizales	Caldas	1785	5.14	-75.49	22/10/94	31/12/14	0%
La Linda	Cenicafé	Pacora	Caldas	1750	5.55	-75.53	1/7/83	31/12/14	21%
La Manuelita	Cenicafé	Riosucio	Caldas	1460	5.37	-75.68	1/5/70	31/12/14	6%
La Margarita IDEAM	IDEAM	Risaralda	Caldas	980	5.13	-75.72	1/1/64	23/11/83	24%
La María	IDEAM	Aguadas	Caldas	704	5.58	-75.57	1/1/62	30/9/15	1%
La Mesa Chinchiná	CHEC	Villamaría	Caldas	2635	4.97	-75.39	25/10/95	30/9/12	11%
La Miranda IDEAM	IDEAM	Salamina	Caldas	2175	5.42	-75.33	1/1/04	30/9/15	9%
La Oriental	Cenicafé	Quinchia	Risaralda	1730	5.37	-75.72	27/5/81	31/12/13	9%
La Palma GENSA	GENSA	Pensilvania	Caldas	1313	5.44	-75	1/9/81	31/5/02	2%
La Palma ISAGEN	GENSA - ISAGEN	Samaná	Caldas	1313	5.44	-75	1/1/64	28/2/14	2%
La Palma palestina	Cenicafé	Palestina	Caldas	1165	5.02	-75.68	1/5/87	31/12/14	2%
La Palmera	Cenicafé	Marsella	Risaralda	1450	5	-75.75	1/1/81	31/12/14	23%
La Pastorita	Cenicafé	Victoria	Caldas	1122	5.32	-74.97	1/1/79	30/11/14	15%
La Pelada	IDEAM	Aguadas	Caldas	2180	5.57	-75.33	24/4/94	30/8/15	2%
La Pintada	IDEAM	Aguadas	Caldas	585	5.73	-75.6	2/6/80	30/9/15	5%
La Playa	Cenicafé	Pereira	Risaralda	1290	4.82	-75.76	1/1/72	31/12/14	3%
La Renta	Cenicafé	Pereira	Risaralda	1194	4.78	-75.78	1/7/87	31/12/14	5%
La Romelia	Cenicafé	Chinchiná	Caldas	1335	4.97	-75.65	1/1/94	31/12/14	0%
La Selva	Cenicafé	Manizales	Caldas	1312	5.09	-75.6	1/1/85	31/12/14	8%
La Sierra	Cenicafé	Chinchiná	Caldas	1440	4.98	-75.63	1/1/88	31/12/14	1%
La Tribuna	Cenicafé	Balboa	Risaralda	1580	4.95	-75.97	19/4/72	31/12/14	13%
La Victoria	IDEAM	Victoria	Caldas	675	5.32	-74.9	12/8/74	30/6/15	2%
Las Brisas	IDEAM	Villamaría	Caldas	4150	4.9	-75.35	12/10/81	30/11/14	19%
Las Colinas	Cenicafé	Manizales	Caldas	1450	5.1	-75.57	1/5/91	31/12/14	5%
Las Pavas	IDEAM	Aguadas	Caldas	2591	5.52	-75.38	1/6/94	31/8/15	5%
Llanadas	Cenicafé	Manzanares	Caldas	1463	5.2	-75.13	1/1/56	30/12/98	2%
Los Cámbulos belén	Cenicafé	Belén de Umbría	Risaralda	1400	5.15	-75.88	1/4/88	30/11/14	26%
Los Cámbulos Pereira	Cenicafé	Pereira	Risaralda	1189	4.82	-75.84	1/1/64	31/12/14	7%
Los Naranjos	Cenicafé	Santuario	Risaralda	1580	5.05	-76	1/1/81	31/12/14	24%
Los Pomos	Cenicafé	Chinchiná	Caldas	1538	4.97	-75.58	1/2/92	30/4/08	3%
Manzanares IDEAM	IDEAM	Manzanares	Caldas	2000	5.25	-75.13	1/1/72	30/9/14	10%
Manzanares La Clara	GENSA	Manzanares	Caldas	1956	5.27	-75.14	1/4/74	31/10/02	2%

Estación	Entidad	Municipio	Departamento	Altura	Lat.	Long.	Reg. Des.	Reg. Has.	Faltantes
Marquetalia GENSA	GENSA	Marquetalia	Caldas	1570	5.3	-75.06	1/1/75	31/10/02	3%
Marquetalia IDEAM	IDEAM	Marquetalia	Caldas	1600	5.28	-75.05	18/2/63	30/9/15	5%
Martinica	Aguas/Mzls	Manizales	CALDAS	3568	5.07	-75.38	1/1/93	1/11/12	0%
Marulanda IDEAM	IDEAM	Marulanda	Caldas	2637	5.27	-75.27	5/8/74	30/9/15	3%
Miguel Valencia	Cenicafé	Jardín	Antioquia	1621	5.6	-75.85	1/1/53	31/5/12	0%
Montenegro Q.Molinos	CHEC	Villamaría	Caldas	2292	4.94	-75.47	29/11/63	30/9/12	5%
Montevideo	CHEC	Chinchiná	Caldas	1370	5	-75.58	13/9/60	31/12/12	3%
Moravo	Cenicafé	Chinchiná	Caldas	1146	5.01	-75.71	1/4/96	30/11/14	4%
Naranjal	Cenicafé	Chinchiná	Caldas	1381	4.97	-75.65	1/1/56	31/12/14	0%
Neira	IDEAM	Neira	Caldas	1860	5.16	-75.52	19/9/70	30/9/15	9%
Neira Rio Tapias	CHEC	Neira	Caldas	1902	5.16	-75.61	13/8/75	31/10/12	1%
Norcasia	IDEAM	Norcasia	Caldas	730	5.57	-74.88	7/3/79	30/9/15	10%
Olivares	Aguas/Mzls	Manizales	Caldas	2237	5.07	-75.45	1/1/96	31/10/12	0%
Ospirma	Cenicafé	Guatica	Risaralda	1661	5.33	-75.81	1/1/81	31/12/14	2%
Pacora plaza feria	IDEAM	Pácora	Caldas	1730	5.52	-75.45	2/8/70	30/9/15	4%
Papayal	IDEAM	Villamaría	Caldas	2220	4.95	-75.49	1/10/70	30/11/14	3%
Paraguaicito	Cenicafé	Buenavista	Quindío	1203	4.4	-75.73	1/1/63	31/12/14	0%
Pensilvania	GENSA - ISAGEN	Pensilvania	Caldas	2027	5.39	-75.16	1/1/76	28/2/14	10%
Planalto	Cenicafé	Manizales	Caldas	1413	4.99	-75.59	1/1/94	31/12/14	0%
Planta de Tratamiento	Cenicafé	Pereira	Risaralda	1487	4.81	-75.67	1/1/70	31/12/13	1%
Planta Sancancio	CHEC	Manizales	Caldas	1850	5.04	-75.5	1/7/60	31/10/12	1%
Puente Samaná	ISAGEN	Samaná	Caldas	460	5.38	-74.94	1/7/03	28/2/14	1%
Rafael Escobar	Cenicafé	Supía	Caldas	1307	5.46	-75.64	1/1/71	31/12/14	0%
Riosucio	IDEAM	Riosucio	Caldas	1950	5.42	-75.72	1/4/70	31/8/15	35%
Romerales	Aguas/Mzls	Manizales	CALDAS	2403	4.99	-75.43	1/1/97	31/10/12	0%
Salamina Conc Barc	IDEAM	Salamina	Caldas	1744	5.38	-75.48	2/8/70	31/8/15	3%
San Antonio	Aguas/Mzls	Manizales	Caldas	2562	4.97	-75.43	1/1/93	31/10/12	0%
San Daniel	GENSA	Pensilvania	Caldas	1700	5.38	-75.08	1/1/68	31/10/02	0%
San Félix	IDEAM	Salamina	Caldas	2696	5.37	-75.37	1/8/70	31/7/15	6%
San José Pensilvania	IDEAM	Pensilvania	Caldas	2100	5.37	-75.13	15/8/74	30/4/15	5%
Santa Cruz	Cenicafé	Fredonia	Antioquia	1400	5.9	-75.63	1/1/93	31/12/14	0%
Santa Helena	Cenicafé	Marquetalia	Caldas	1395	5.32	-75	1/12/80	31/12/14	0%
Santa Teresa	Cenicafé	Manizales	Caldas	1698	5.11	-75.54	1/7/91	31/12/13	1%
Santa Teresita	Cenicafé	Manizales	Caldas	1172	5.07	-75.61	1/5/89	31/12/14	4%
Santágueda	Cenicafé	Palestina	Caldas	1026	5.07	-75.67	1/1/64	31/12/14	0%
Subestación Alta Suiza	CHEC	Manizales	Caldas	2055	5.06	-75.49	21/7/75	31/7/12	3%
Subestación Marmato	CHEC	Marmato	Caldas	2000	5.07	-75.52	29/1/65	31/12/10	7%
Subestación Uribe	CHEC	Manizales	Caldas	1905	5.06	-75.54	20/7/75	31/8/12	3%
Tarro pintado	ISAGEN	Samaná	Caldas	482.91	5.51	-74.97	1/1/03	28/2/14	2%
Túnel de Fuga	ISAGEN	Norcasia	Caldas	216	5.63	-75.05	1/4/03	28/2/14	11%
Valle Alto	IDEAM	Salamina	Caldas	3158	5.35	-75.32	21/4/94	30/9/15	26%
Villaraz	Cenicafé	Pensilvania	Caldas	1641	5.38	-75.07	1/7/93	30/11/13	22%
Abejorral	IDEAM	Abejorral	Antioquia	2190	5.78	-75.42	3/6/70	6/7/12	0%
Aeropuerto La Nubia	IDEAM	Manizales	Caldas	2058	5.03	-75.47	1/1/68	31/10/14	3%
Aeropuerto Matecana	IDEAM	Pereira	Risaralda	1342	4.8	-75.73	3/9/47	13/6/12	0%
Aeropuerto Santágueda	IDEAM	Palestina	Caldas	933	5.08	-75.68	1/9/49	30/9/89	37%
Agronomía	Cenicafé	Manizales	Caldas	2088	5.06	-75.5	1/1/56	31/12/14	2%
Aguadas	IDEAM	Aguadas	Caldas	2071	5.6	-75.45	1/8/70	31/8/15	3%
Albania	IDEAM	Mariquita	Tolima	500	5.28	-74.9	1/5/87	25/5/12	6%
Almacafé letras	Cenicafé	Manizales	Caldas	3684	5.05	-75.33	1/5/00	31/12/14	2%
Almacafé Vivero	Cenicafé	Quimbaya	Quindío	1330	4.62	-75.77	1/11/51	31/12/14	3%
Alto del Oso	IDEAM	Murillo	Tolima	3150	4.85	-75.25	12/3/86	23/2/12	0%

Estación	Entidad	Municipio	Departamento	Altura	Lat.	Long.	Reg. Des.	Reg. Has.	Faltantes
Arauca	IDEAM	Palestina	Caldas	890	5.11	-75.7	24/2/62	30/5/12	0%
Bariloche	Cenicafé	Fredonia	Antioquia	1748	5.92	-75.7	1/1/80	31/12/14	2%
Bellavista	IDEAM	Anserma	Caldas	1932	5.27	-75.8	21/9/63	31/10/15	25%
Bocatoma Campoalegre	CHEC	Chinchiná	Caldas	1470	4.93	-75.63	12/8/60	30/9/12	5%
Bolivia	GENSA	Pensilvania	Caldas	1750	5.33	-75.12	1/1/64	31/10/02	3%
Buenos Aires	Cenicafé	Guatica	Risaralda	1814	5.31	-75.8	1/1/81	30/11/13	3%
Cañaveral GENSA	GENSA - ISAGEN	Victoria	Caldas	1100	5.32	-74.94	1/6/68	3/5/14	21%
Cañaveral IDEAM	IDEAM	Victoria	Caldas	920	5.32	-74.93	11/8/74	30/9/14	2%
Carimagua	Cenicafé	Amaga	Antioquia	1802	6.02	-75.68	1/3/97	30/11/12	9%
Cenicafé	Cenicafé	Chinchiná	Caldas	1310	5	-75.6	1/1/51	31/12/14	0%
Claro de Luna	IDEAM	Sonson	Antioquia	180	5.85	-74.77	1/5/88	31/5/11	11%
Cocorná	Cenicafé	Cocorná	Antioquia	1344	6.06	-75.19	1/1/97	31/12/14	0%
Combia	Cenicafé	Pereira	Risaralda	1173	4.84	-75.78	1/1/81	31/10/14	3%
Cuatro Esquinas	Cenicafé	Aguadas	Caldas	1900	5.67	-75.42	6/9/83	31/12/14	6%
Cuba	Cenicafé	Victoria	Caldas	1054	5.33	-74.93	1/3/89	30/9/14	13%
El Barranco	Cenicafé	Mistrató	Risaralda	1580	5.33	-75.88	8/10/87	31/12/14	2%
El Bosque	Cenicafé	Dosquebradas	Risaralda	1458	4.84	-75.68	1/5/78	31/12/10	4%
El Cedral	Cenicafé	Pereira	Risaralda	2120	4.7	-75.53	1/1/61	31/12/14	9%
El Cedral Sabinas	CHEC	Manizales	Caldas	1338	5.03	-75.42	19/10/95	30/9/12	6%
El Chispero Lago Cameguadua	CHEC	Chinchiná	Caldas	1400	5	-75.62	24/2/90	31/10/12	4%
El Descanso	Cenicafé	Marmato	Caldas	1803	5.5	-75.61	13/10/80	31/1/13	7%
El Diamante	Cenicafé	Quinchia	Risaralda	1550	5.32	-75.7	1/1/81	31/12/14	4%
El Edén IDEAM	IDEAM	Fresno	Tolima	1350	5.15	-75.03	5/6/58	30/4/12	4%
El Inciensial	Cenicafé	Murillo	Tolima	2400	4.88	-75.13	1/6/88	31/3/12	2%
El Jazmín	Cenicafé	Santa Rosa de Cabal	Risaralda	1635	4.91	-75.62	26/7/60	31/12/14	0%
El Mirador	Cenicafé	Filadelfia	Caldas	1650	5.23	-75.57	1/8/93	31/12/14	2%
El Recreo	Cenicafé	Palestina	Caldas	1430	5.04	-75.65	1/1/70	31/12/14	6%
El Recuerdo	IDEAM	Marsella	Risaralda	1560	4.96	-75.74	9/9/70	1/6/11	0%
El Rosario	Cenicafé	Venecia	Antioquia	1635	5.96	-75.71	1/1/67	31/12/14	0%
El Trapiche	Cenicafé	Bolívar	Antioquia	1277	5.8	-76.01	14/11/96	29/2/12	1%
El Vergel	GENSA - ISAGEN	Norcasia	Caldas	507	5.57	-74.88	1/1/80	3/5/14	1%
Florencia GENSA	GENSA - ISAGEN	Samaná	Caldas	1535	5.52	-75.03	15/5/78	3/5/14	23%
Florencia IDEAM	IDEAM	Samaná	Caldas	1575	5.53	-75.05	1/1/78	31/7/95	50%
Granja Kennedy	Cenicafé	Pensilvania	Caldas	1900	5.33	-75.1	1/7/93	31/12/14	34%
Granja Luker	Cenicafé	Palestina	Caldas	1031	5.07	-75.68	1/1/64	31/12/14	0%
Guaymaral	Cenicafé	Aguadas	Caldas	1600	5.65	-75.45	1/10/61	31/12/14	2%
Guerrero	IDEAM	Quinchia	Risaralda	810	5.28	-75.66	18/10/78	31/12/11	0%
Hogar Juvenil	Cenicafé	Pensilvania	Caldas	1560	5.5	-75.18	1/7/89	31/12/14	2%
IDEMA Dorada	IDEAM	La Dorada	Caldas	270	5.47	-74.67	1/7/64	30/9/15	12%
IDEMA Honda	IDEAM	Honda	Tolima	196	5.2	-74.73	27/8/64	30/5/12	9%
Ínsula	CHEC	Chinchiná	Caldas	1225	5	-75.65	18/9/60	31/10/12	4%
Java	Cenicafé	Manizales	Caldas	1778	5.01	-75.54	1/10/80	31/12/14	3%
La Argentina Riosucio	Cenicafé	Riosucio	Caldas	1420	5.47	-75.7	1/1/86	31/12/14	2%
La Argentina Palestina	Cenicafé	Palestina	Caldas	1354	5.03	-75.68	1/4/78	30/1/15	1%
La Bella	Cenicafé	Calarcá	Quindío	1449	4.5	-75.67	1/1/51	31/12/14	0%
La Blanquita	Cenicafé	Fredonia	Antioquia	570	5.82	-75.68	17/1/84	31/12/14	3%
La Cascada	Cenicafé	Pacora	Caldas	1600	5.47	-75.55	1/7/83	31/12/14	31%
La Catalina	Cenicafé	Pereira	Risaralda	1321	4.75	-75.74	1/1/86	31/12/14	0%
La Cristalina fenicare	Cenicafé	Támesis	Antioquia	775	5.71	-75.67	1/1/96	31/12/14	5%
La Cristalina IDEAM	IDEAM	Neira	Caldas	2290	5.19	-75.43	22/9/70	30/9/15	4%
La Divisa	Cenicafé	Chinchiná	Caldas	1590	4.98	-75.6	1/5/92	31/12/14	0%
La Esperanza filandia	Cenicafé	Filandia	Quindío	1671	4.64	-75.69	1/2/88	31/12/14	1%
La Esperanza	IDEAM	Manizales	Caldas	3280	5.02	-75.36	4/10/70	30/11/14	2%
La Esperanza	IDEAM	Honda	Tolima	222	5.26	-74.73	1/1/71	31/1/12	3%

Estación	Entidad	Municipio	Departamento	Altura	Lat.	Long.	Reg. Des.	Reg. Has.	Faltantes
Honda									
La Francia	Cenicafé	Chinchiná	Caldas	1335	4.97	-75.65	1/1/77	31/12/14	19%
La Juliana	Cenicafé	Manizales	Caldas	1785	5.14	-75.49	22/10/94	31/12/14	0%
La Linda	Cenicafé	Pacora	Caldas	1750	5.55	-75.53	1/7/83	31/12/14	21%
La Manuelita	Cenicafé	Riosucio	Caldas	1460	5.37	-75.68	1/5/70	31/12/14	6%
La Margarita IDEAM	IDEAM	Risaralda	Caldas	980	5.13	-75.72	1/1/64	23/11/83	24%
La María	IDEAM	Aguadas	Caldas	704	5.58	-75.57	1/1/62	30/9/15	1%
La Mesa Chinchiná	CHEC	Villa María	Caldas	2635	4.97	-75.39	25/10/95	30/9/12	11%
La Miranda IDEAM	IDEAM	Salamina	Caldas	2175	5.42	-75.33	1/1/04	30/9/15	9%
La Oriental	Cenicafé	Quinchia	Risaralda	1730	5.37	-75.72	27/5/81	31/12/13	9%
La Palma GENSA	GENSA	Pensilvania	Caldas	1313	5.44	-75	1/9/81	31/5/02	2%
La Palma ISAGEN	GENSA - ISAGEN	Samaná	Caldas	1313	5.44	-75	1/1/64	28/2/14	2%
La Palma palestina	Cenicafé	Palestina	Caldas	1165	5.02	-75.68	1/5/87	31/12/14	2%
La Palmera	Cenicafé	Marsella	Risaralda	1450	5	-75.75	1/1/81	31/12/14	23%
La Pastorita	Cenicafé	Victoria	Caldas	1122	5.32	-74.97	1/1/79	30/11/14	15%
La Pelada	IDEAM	Aguadas	Caldas	2180	5.57	-75.33	24/4/94	30/8/15	2%
La Pintada	IDEAM	Aguadas	Caldas	585	5.73	-75.6	2/6/80	30/9/15	5%
La Playa	Cenicafé	Pereira	Risaralda	1290	4.82	-75.76	1/1/72	31/12/14	3%
La Renta	Cenicafé	Pereira	Risaralda	1194	4.78	-75.78	1/7/87	31/12/14	5%
La Romelia	Cenicafé	Chinchiná	Caldas	1335	4.97	-75.65	1/1/94	31/12/14	0%
La Selva	Cenicafé	Manizales	Caldas	1312	5.09	-75.6	1/1/85	31/12/14	8%
La Sierra	Cenicafé	Chinchiná	Caldas	1440	4.98	-75.63	1/1/88	31/12/14	1%
La Tribuna	Cenicafé	Balboa	Risaralda	1580	4.95	-75.97	19/4/72	31/12/14	13%
La Victoria	IDEAM	Victoria	Caldas	675	5.32	-74.9	12/8/74	30/6/15	2%
Las Brisas	IDEAM	Villamaría	Caldas	4150	4.9	-75.35	12/10/81	30/11/14	19%
Las Colinas	Cenicafé	Manizales	Caldas	1450	5.1	-75.57	1/5/91	31/12/14	5%
Las Pavas	IDEAM	Aguadas	Caldas	2591	5.52	-75.38	1/6/94	31/8/15	5%
Llanadas	Cenicafé	Manzanares	Caldas	1463	5.2	-75.13	1/1/56	30/12/98	2%
Los Cábulos belén	Cenicafé	Belén de Umbría	Risaralda	1400	5.15	-75.88	1/4/88	30/11/14	26%
Los Cábulos Pereira	Cenicafé	Pereira	Risaralda	1189	4.82	-75.84	1/1/64	31/12/14	7%
Los Naranjos	Cenicafé	Santuario	Risaralda	1580	5.05	-76	1/1/81	31/12/14	24%
Los Pomos	Cenicafé	Chinchiná	Caldas	1538	4.97	-75.58	1/2/92	30/4/08	3%
Manzanares IDEAM	IDEAM	Manzanares	Caldas	2000	5.25	-75.13	1/1/72	30/9/14	10%
Manzanares La Clara	GENSA	Manzanares	Caldas	1956	5.27	-75.14	1/4/74	31/10/02	2%
Marquetalia GENSA	GENSA	Marquetalia	Caldas	1570	5.3	-75.06	1/1/75	31/10/02	3%
Marquetalia IDEAM	IDEAM	Marquetalia	Caldas	1600	5.28	-75.05	18/2/63	30/9/15	5%
Martinica	Aguas/ Mzls	Manizales	CALDAS	3568	5.07	-75.38	1/1/93	1/11/12	0%
Marulanda IDEAM	IDEAM	Marulanda	Caldas	2637	5.27	-75.27	5/8/74	30/9/15	3%
Miguel Valencia	Cenicafé	Jardín	Antioquia	1621	5.6	-75.85	1/1/53	31/5/12	0%
Montenegro Q. Molinos	CHEC	Villamaría	Caldas	2292	4.94	-75.47	29/11/63	30/9/12	5%
Montevideo	CHEC	Chinchiná	Caldas	1370	5	-75.58	13/9/60	31/12/12	3%
Moravo	Cenicafé	Chinchiná	Caldas	1146	5.01	-75.71	1/4/96	30/11/14	4%
Naranjal	Cenicafé	Chinchiná	Caldas	1381	4.97	-75.65	1/1/56	31/12/14	0%
Neira	IDEAM	Neira	Caldas	1860	5.16	-75.52	19/9/70	30/9/15	9%
Neira Río Tapias	CHEC	Neira	Caldas	1902	5.16	-75.61	13/8/75	31/10/12	1%
Norcasia	IDEAM	Norcasia	Caldas	730	5.57	-74.88	7/3/79	30/9/15	10%
Olivares	Aguas/ Mzls	Manizales	Caldas	2237	5.07	-75.45	1/1/96	31/10/12	0%
Ospirma	Cenicafé	Guática	Risaralda	1661	5.33	-75.81	1/1/81	31/12/14	2%
Pacora plaza feria	IDEAM	Pacora	Caldas	1730	5.52	-75.45	2/8/70	30/9/15	4%
Papayal	IDEAM	Villamaría	Caldas	2220	4.95	-75.49	1/10/70	30/11/14	3%
Paraguaicito	Cenicafé	Buenavista	Quindío	1203	4.4	-75.73	1/1/63	31/12/14	0%
Pensilvania	GENSA - ISAGEN	Pensilvania	Caldas	2027	5.39	-75.16	1/1/76	28/2/14	10%
Planalto	Cenicafé	Manizales	Caldas	1413	4.99	-75.59	1/1/94	31/12/14	0%
Planta de Tratamiento	Cenicafé	Pereira	Risaralda	1487	4.81	-75.67	1/1/70	31/12/13	1%
Planta Sancancio	CHEC	Manizales	Caldas	1850	5.04	-75.5	1/7/60	31/10/12	1%

Estación	Entidad	Municipio	Departamento	Altura	Lat.	Long.	Reg. Des.	Reg. Has.	Faltantes
Puente Samaná	ISAGEN	Samaná	Caldas	460	5.38	-74.94	1/7/03	28/2/14	1%
Rafael Escobar	Cenicafé	Supía	Caldas	1307	5.46	-75.64	1/1/71	31/12/14	0%
Riosucio	IDEAM	Riosucio	Caldas	1950	5.42	-75.72	1/4/70	31/8/15	35%
Romerales	Aguas/ Mzls	Manizales	CALDAS	2403	4.99	-75.43	1/1/97	31/10/12	0%
Salamina Conc Barc	IDEAM	Salamina	Caldas	1744	5.38	-75.48	2/8/70	31/8/15	3%
San Antonio	Aguas/ Mzls	Manizales	Caldas	2562	4.97	-75.43	1/1/93	31/10/12	0%
San Daniel	GENSA	Pensilvania	Caldas	1700	5.38	-75.08	1/1/68	31/10/02	0%
San Félix	IDEAM	Salamina	Caldas	2696	5.37	-75.37	1/8/70	31/7/15	6%
San José Pensilvania	IDEAM	Pensilvania	Caldas	2100	5.37	-75.13	15/8/74	30/4/15	5%
Santa Cruz	Cenicafé	Fredonia	Antioquia	1400	5.9	-75.63	1/1/93	31/12/14	0%
Santa Helena	Cenicafé	Marquetalia	Caldas	1395	5.32	-75	1/12/80	31/12/14	0%
Santa Teresa	Cenicafé	Manizales	Caldas	1698	5.11	-75.54	1/7/91	31/12/13	1%
Santa Teresita	Cenicafé	Manizales	Caldas	1172	5.07	-75.61	1/5/89	31/12/14	4%
Santágueda	Cenicafé	Palestina	Caldas	1026	5.07	-75.67	1/1/64	31/12/14	0%
Subestación Alta Suiza	CHEC	Manizales	Caldas	2055	5.06	-75.49	21/7/75	31/7/12	3%
Subestación Marmato	CHEC	Marmato	Caldas	2000	5.07	-75.52	29/1/65	31/12/10	7%
Subestación Uribe	CHEC	Manizales	Caldas	1905	5.06	-75.54	20/7/75	31/8/12	3%
Tarro pintado	ISAGEN	Samaná	Caldas	483	5.51	-74.97	1/1/03	28/2/14	2%
Túnel de Fuga	ISAGEN	Norcasia	Caldas	216	5.63	-75.05	1/4/03	28/2/14	11%
Valle Alto	IDEAM	Salamina	Caldas	3158	5.35	-75.32	21/4/94	30/9/15	26%
Villaraz	Cenicafé	Pensilvania	Caldas	1641	5.38	-75.07	1/7/93	30/11/13	22%
Abejorral	IDEAM	Abejorral	Antioquia	2190	5.78	-75.42	3/6/70	6/7/12	0%
Aeropuerto La Nubia	IDEAM	Manizales	Caldas	2058	5.03	-75.47	1/1/68	31/10/14	3%
Aeropuerto Matecana	IDEAM	Pereira	Risaralda	1342	4.8	-75.73	3/9/47	13/6/12	0%
Aeropuerto Santágueda	IDEAM	Palestina	Caldas	933	5.08	-75.68	1/9/49	30/9/89	37%
Agronomía	Cenicafé	Manizales	Caldas	2088	5.06	-75.5	1/1/56	31/12/14	2%
Aguadas	IDEAM	Aguadas	Caldas	2071	5.6	-75.45	1/8/70	31/8/15	3%
Albania	IDEAM	Mariquita	Tolima	500	5.28	-74.9	1/5/87	25/5/12	6%
Almacafé letras	Cenicafé	Manizales	Caldas	3684	5.05	-75.33	1/5/00	31/12/14	2%
Almacafé Vivero	Cenicafé	Quimbaya	Quindío	1330	4.62	-75.77	1/11/51	31/12/14	3%
Alto del Oso	IDEAM	Murillo	Tolima	3150	4.85	-75.25	12/3/86	23/2/12	0%
Arauca	IDEAM	Palestina	Caldas	890	5.11	-75.7	24/2/62	30/5/12	0%
Bariloche	Cenicafé	Fredonia	Antioquia	1748	5.92	-75.7	1/1/80	31/12/14	2%
Bellavista	IDEAM	Anserma	Caldas	1932	5.27	-75.8	21/9/63	31/10/15	25%
Bocatoma Campoalegre	CHEC	Chinchiná	Caldas	1470	4.93	-75.63	12/8/60	30/9/12	5%
Bolivia	GENSA	Pensilvania	Caldas	1750	5.33	-75.12	1/1/64	31/10/02	3%
Buenos Aires	Cenicafé	Guatica	Risaralda	1814	5.31	-75.8	1/1/81	30/11/13	3%
Cañaveral GENSA	GENSA - ISAGEN	Victoria	Caldas	1100	5.32	-74.94	1/6/68	3/5/14	21%
Cañaveral IDEAM	IDEAM	Victoria	Caldas	920	5.32	-74.93	11/8/74	30/9/14	2%
Carimagua	Cenicafé	Amaga	Antioquia	1802	6.02	-75.68	1/3/97	30/11/12	9%
Cenicafé	Cenicafé	Chinchiná	Caldas	1310	5	-75.6	1/1/51	31/12/14	0%
Claro de Luna	IDEAM	Sonson	Antioquia	180	5.85	-74.77	1/5/88	31/5/11	11%
Cocorná	Cenicafé	Cocorná	Antioquia	1344	6.06	-75.19	1/1/97	31/12/14	0%
Combia	Cenicafé	Pereira	Risaralda	1173	4.84	-75.78	1/1/81	31/10/14	3%
Cuatro Esquinas	Cenicafé	Aguadas	Caldas	1900	5.67	-75.42	6/9/83	31/12/14	6%
Cuba	Cenicafé	Victoria	Caldas	1054	5.33	-74.93	1/3/89	30/9/14	13%
El Barranco	Cenicafé	Mistrató	Risaralda	1580	5.33	-75.88	8/10/87	31/12/14	2%
El Bosque	Cenicafé	Dosquebradas	Risaralda	1458	4.84	-75.68	1/5/78	31/12/10	4%
El Cedral	Cenicafé	Pereira	Risaralda	2120	4.7	-75.53	1/1/61	31/12/14	9%
El Cedral Sabinas	CHEC	Manizales	Caldas	1338	5.03	-75.42	19/10/95	30/9/12	6%
El Chispero Lago Cameguadua	CHEC	Chinchiná	Caldas	1400	5	-75.62	24/2/90	31/10/12	4%
El Descanso	Cenicafé	Marmato	Caldas	1803	5.5	-75.61	13/10/80	31/1/13	7%
El Diamante	Cenicafé	Quinchia	Risaralda	1550	5.32	-75.7	1/1/81	31/12/14	4%
El Edén IDEAM	IDEAM	Fresno	Tolima	1350	5.15	-75.03	5/6/58	30/4/12	4%

Estación	Entidad	Municipio	Departamento	Altura	Lat.	Long.	Reg. Des.	Reg. Has.	Faltantes
El Inciensial	Cenicafé	Murillo	Tolima	2400	4.88	-75.13	1/6/88	31/3/12	2%
El Jazmín	Cenicafé	Santa Rosa de Cabal	Risaralda	1635	4.91	-75.62	26/7/60	31/12/14	0%
El Mirador	Cenicafé	Filadelfia	Caldas	1650	5.23	-75.57	1/8/93	31/12/14	2%
El Recreo	Cenicafé	Palestina	Caldas	1430	5.04	-75.65	1/1/70	31/12/14	6%
El Recuerdo	IDEAM	Marsella	Risaralda	1560	4.96	-75.74	9/9/70	1/6/11	0%
El Rosario	Cenicafé	Venecia	Antioquia	1635	5.96	-75.71	1/1/67	31/12/14	0%
El Trapiche	Cenicafé	Bolívar	Antioquia	1277	5.8	-76.01	14/11/96	29/2/12	1%
El Vergel	GENSA - ISAGEN	Norcasia	Caldas	507	5.57	-74.88	1/1/80	3/5/14	1%
Florencia GENSA	GENSA - ISAGEN	Samaná	Caldas	1535	5.52	-75.03	15/5/78	3/5/14	23%
Florencia IDEAM	IDEAM	Samaná	Caldas	1575	5.53	-75.05	1/1/78	31/7/95	50%
Granja Kennedy	Cenicafé	Pensilvania	Caldas	1900	5.33	-75.1	1/7/93	31/12/14	34%
Granja Luker	Cenicafé	Palestina	Caldas	1031	5.07	-75.68	1/1/64	31/12/14	0%
Guaymaral	Cenicafé	Aguadas	Caldas	1600	5.65	-75.45	1/10/61	31/12/14	2%
Guerrero	IDEAM	Quinchia	Risaralda	810	5.28	-75.66	18/10/78	31/12/11	0%
Hogar Juvenil	Cenicafé	Pensilvania	Caldas	1560	5.5	-75.18	1/7/89	31/12/14	2%
IDEAM Dorada	IDEAM	La Dorada	Caldas	270	5.47	-74.67	1/7/64	30/9/15	12%
IDEAM Honda	IDEAM	Honda	Tolima	196	5.2	-74.73	27/8/64	30/5/12	9%
Ínsula	CHEC	Chinchiná	Caldas	1225	5	-75.65	18/9/60	31/10/12	4%
Java	Cenicafé	Manizales	Caldas	1778	5.01	-75.54	1/10/80	31/12/14	3%
La Argentina Riosucio	Cenicafé	Riosucio	Caldas	1420	5.47	-75.7	1/1/86	31/12/14	2%
La Argentina Palestina	Cenicafé	Palestina	Caldas	1354	5.03	-75.68	1/4/78	30/1/15	1%
La Bella	Cenicafé	Calarcá	Quindío	1449	4.5	-75.67	1/1/51	31/12/14	0%
La Blanquita	Cenicafé	Fredonia	Antioquia	570	5.82	-75.68	17/1/84	31/12/14	3%
La Cascada	Cenicafé	Pacora	Caldas	1600	5.47	-75.55	1/7/83	31/12/14	31%
La Catalina	Cenicafé	Pereira	Risaralda	1321	4.75	-75.74	1/1/86	31/12/14	0%
La Cristalina fenicare	Cenicafé	Támesis	Antioquia	775	5.71	-75.67	1/1/96	31/12/14	5%
La Cristalina IDEAM	IDEAM	Neira	Caldas	2290	5.19	-75.43	22/9/70	30/9/15	4%
La Divisa	Cenicafé	Chinchiná	Caldas	1590	4.98	-75.6	1/5/92	31/12/14	0%
La Esperanza filandia	Cenicafé	Filandia	Quindío	1671	4.64	-75.69	1/2/88	31/12/14	1%
La Esperanza	IDEAM	Manizales	Caldas	3280	5.02	-75.36	4/10/70	30/11/14	2%
La Esperanza Honda	IDEAM	Honda	Tolima	222	5.26	-74.73	1/1/71	31/1/12	3%
La Francia	Cenicafé	Chinchiná	Caldas	1335	4.97	-75.65	1/1/77	31/12/14	19%
La Juliana	Cenicafé	Manizales	Caldas	1785	5.14	-75.49	22/10/94	31/12/14	0%
La Linda	Cenicafé	Pacora	Caldas	1750	5.55	-75.53	1/7/83	31/12/14	21%
La Manuelita	Cenicafé	Riosucio	Caldas	1460	5.37	-75.68	1/5/70	31/12/14	6%
La Margarita IDEAM	IDEAM	Risaralda	Caldas	980	5.13	-75.72	1/1/64	23/11/83	24%
La María	IDEAM	Aguadas	Caldas	704	5.58	-75.57	1/1/62	30/9/15	1%
La Mesa Chinchiná	CHEC	Villamaría	Caldas	2635	4.97	-75.39	25/10/95	30/9/12	11%
La Miranda IDEAM	IDEAM	Salamina	Caldas	2175	5.42	-75.33	1/1/04	30/9/15	9%
La Oriental	Cenicafé	Quinchia	Risaralda	1730	5.37	-75.72	27/5/81	31/12/13	9%
La Palma GENSA	GENSA	Pensilvania	Caldas	1313	5.44	-75	1/9/81	31/5/02	2%
La Palma ISAGEN	GENSA	Samaná	Caldas	1313	5.44	-75	1/1/64	28/2/14	2%
La Palma palestina	Cenicafé	Palestina	Caldas	1165	5.02	-75.68	1/5/87	31/12/14	2%
La Palmera	Cenicafé	Marsella	Risaralda	1450	5	-75.75	1/1/81	31/12/14	23%
La Pastorita	Cenicafé	Victoria	Caldas	1122	5.32	-74.97	1/1/79	30/11/14	15%
La Pelada	IDEAM	Aguadas	Caldas	2180	5.57	-75.33	24/4/94	30/8/15	2%
La Pintada	IDEAM	Aguadas	Caldas	585	5.73	-75.6	2/6/80	30/9/15	5%
La Playa	Cenicafé	Pereira	Risaralda	1290	4.82	-75.76	1/1/72	31/12/14	3%
La Renta	Cenicafé	Pereira	Risaralda	1194	4.78	-75.78	1/7/87	31/12/14	5%
La Romelia	Cenicafé	Chinchiná	Caldas	1335	4.97	-75.65	1/1/94	31/12/14	0%
La Selva	Cenicafé	Manizales	Caldas	1312	5.09	-75.6	1/1/85	31/12/14	8%
La Sierra	Cenicafé	Chinchiná	Caldas	1440	4.98	-75.63	1/1/88	31/12/14	1%
La Tribuna	Cenicafé	Balboa	Risaralda	1580	4.95	-75.97	19/4/72	31/12/14	13%
La Victoria	IDEAM	Victoria	Caldas	675	5.32	-74.9	12/8/74	30/6/15	2%
Las Brisas	IDEAM	Villamaría	Caldas	4150	4.9	-75.35	12/10/81	30/11/14	19%
Las Colinas	Cenicafé	Manizales	Caldas	1450	5.1	-75.57	1/5/91	31/12/14	5%

Estación	Entidad	Municipio	Departamento	Altura	Lat.	Long.	Reg. Des.	Reg. Has.	Faltantes
Las Pavas	IDEAM	Aguadas	Caldas	2591	5.52	-75.38	1/6/94	31/8/15	5%
Llanadas	Cenicafé	Manzanares	Caldas	1463	5.2	-75.13	1/1/56	30/12/98	2%
Los Cábmulos belén	Cenicafé	Belén de Umbría	Risaralda	1400	5.15	-75.88	1/4/88	30/11/14	26%
Los Cábmulos Pereira	Cenicafé	Pereira	Risaralda	1189	4.82	-75.84	1/1/64	31/12/14	7%
Los Naranjos	Cenicafé	Santuario	Risaralda	1580	5.05	-76	1/1/81	31/12/14	24%
Los Pomos	Cenicafé	Chinchiná	Caldas	1538	4.97	-75.58	1/2/92	30/4/08	3%
Manzanares IDEAM	IDEAM	Manzanares	Caldas	2000	5.25	-75.13	1/1/72	30/9/14	10%
Manzanares La Clara	GENSA	Manzanares	Caldas	1956	5.27	-75.14	1/4/74	31/10/02	2%
Marquetalia GENSA	GENSA	Marquetalia	Caldas	1570	5.3	-75.06	1/1/75	31/10/02	3%
Marquetalia IDEAM	IDEAM	Marquetalia	Caldas	1600	5.28	-75.05	18/2/63	30/9/15	5%
Martinica	Aguas/Mzls	Manizales	CALDAS	3568	5.07	-75.38	1/1/93	1/11/12	0%
Marulanda IDEAM	IDEAM	Marulanda	Caldas	2637	5.27	-75.27	5/8/74	30/9/15	3%
Miguel Valencia	Cenicafé	Jardín	Antioquia	1621	5.6	-75.85	1/1/53	31/5/12	0%
Montenegro Q.Molinos	CHEC	Villamaría	Caldas	2292	4.94	-75.47	29/11/63	30/9/12	5%
Montevideo	CHEC	Chinchiná	Caldas	1370	5	-75.58	13/9/60	31/12/12	3%
Moravo	Cenicafé	Chinchiná	Caldas	1146	5.01	-75.71	1/4/96	30/11/14	4%
Naranjal	Cenicafé	Chinchiná	Caldas	1381	4.97	-75.65	1/1/56	31/12/14	0%
Neira	IDEAM	Neira	Caldas	1860	5.16	-75.52	19/9/70	30/9/15	9%
Neira Río Tapias	CHEC	Neira	Caldas	1902	5.16	-75.61	13/8/75	31/10/12	1%
Norcasia	IDEAM	Norcasia	Caldas	730	5.57	-74.88	7/3/79	30/9/15	10%
Olivares	Aguas/Mzls	Manizales	Caldas	2237	5.07	-75.45	1/1/96	31/10/12	0%
Ospirma	Cenicafé	Guática	Risaralda	1661	5.33	-75.81	1/1/81	31/12/14	2%
Pacora plaza feria	IDEAM	Pácora	Caldas	1730	5.52	-75.45	2/8/70	30/9/15	4%
Papayal	IDEAM	Villamaría	Caldas	2220	4.95	-75.49	1/10/70	30/11/14	3%
Paraguaicito	Cenicafé	Buenavista	Quindío	1203	4.4	-75.73	1/1/63	31/12/14	0%
Pensilvania	GENSA - ISAGEN	Pensilvania	Caldas	2026.49	5.39	-75.16	1/1/76	28/2/14	10%
Planalto	Cenicafé	Manizales	Caldas	1413	4.99	-75.59	1/1/94	31/12/14	0%
Planta de Tratamiento	Cenicafé	Pereira	Risaralda	1487	4.81	-75.67	1/1/70	31/12/13	1%
Planta Sancancio	CHEC	Manizales	Caldas	1850	5.04	-75.5	1/7/60	31/10/12	1%
Puente Samaná	ISAGEN	Samaná	Caldas	460	5.38	-74.94	1/7/03	28/2/14	1%
Rafael Escobar	Cenicafé	Supía	Caldas	1307	5.46	-75.64	1/1/71	31/12/14	0%
Riosucio	IDEAM	Riosucio	Caldas	1950	5.42	-75.72	1/4/70	31/8/15	35%
Romerales	Aguas/Mzls	Manizales	CALDAS	2403	4.99	-75.43	1/1/97	31/10/12	0%
Salamina Conc Barc	IDEAM	Salamina	Caldas	1744	5.38	-75.48	2/8/70	31/8/15	3%
San Antonio	Aguas/Mzls	Manizales	Caldas	2562	4.97	-75.43	1/1/93	31/10/12	0%
San Daniel	GENSA	Pensilvania	Caldas	1700	5.38	-75.08	1/1/68	31/10/02	0%
San Félix	IDEAM	Salamina	Caldas	2696	5.37	-75.37	1/8/70	31/7/15	6%
San José Pensilvania	IDEAM	Pensilvania	Caldas	2100	5.37	-75.13	15/8/74	30/4/15	5%
Santa Cruz	Cenicafé	Fredonia	Antioquia	1400	5.9	-75.63	1/1/93	31/12/14	0%
Santa Helena	Cenicafé	Marquetalia	Caldas	1395	5.32	-75	1/12/80	31/12/14	0%
Santa Teresa	Cenicafé	Manizales	Caldas	1698	5.11	-75.54	1/7/91	31/12/13	1%
Santa Teresita	Cenicafé	Manizales	Caldas	1172	5.07	-75.61	1/5/89	31/12/14	4%
Santágueda	Cenicafé	Palestina	Caldas	1026	5.07	-75.67	1/1/64	31/12/14	0%
Subestación Alta Suiza	CHEC	Manizales	Caldas	2055	5.06	-75.49	21/7/75	31/7/12	3%
Subestación Marmato	CHEC	Marmato	Caldas	2000	5.07	-75.52	29/1/65	31/12/10	7%
Subestación Uribe	CHEC	Manizales	Caldas	1905	5.06	-75.54	20/7/75	31/8/12	3%
Tarro pintado	ISAGEN	Samaná	Caldas	482.91	5.51	-74.97	1/1/03	28/2/14	2%
Túnel de Fuga	ISAGEN	Norcasia	Caldas	216	5.63	-75.05	1/4/03	28/2/14	11%
Valle Alto	IDEAM	Salamina	Caldas	3158	5.35	-75.32	21/4/94	30/9/15	26%
Villaraz	Cenicafé	Pensilvania	Caldas	1641	5.38	-75.07	1/7/93	30/11/13	22%
_219_1136	TRMM	Toro	Valle Del Cauca	1296	4.63	-76.13	1/1/97	1/1/15	

Estación	Entidad	Municipio	Departamento	Altura	Lat.	Long.	Reg. Des.	Reg. Has.	Faltantes
_219_1137	TRMM	Cartago	Valle Del Cauca	1180	4.63	-75.88	1/1/97	1/1/15	
_219_1138	TRMM	Circasia	Quindío	1828	4.63	-75.63	1/1/97	1/1/15	
_219_1139	TRMM	Ibagué	Tolima	3529	4.63	-75.38	1/1/97	1/1/15	
_219_1140	TRMM	Anzoátegui	Tolima	2378	4.63	-75.13	1/1/97	1/1/15	
_219_1141	TRMM	Alvarado	Tolima	286	4.63	-74.88	1/1/97	1/1/15	
_219_1142	TRMM	Jerusalén	Cundinamarca	910	4.63	-74.63	1/1/97	1/1/15	
_220_1136	TRMM	El Aguila	Valle Del Cauca	2228	4.88	-76.13	1/1/97	1/1/15	
_220_1137	TRMM	Pereira	Risaralda	996	4.88	-75.88	1/1/97	1/1/15	
_220_1138	TRMM	Santa Rosa De Cabal	Risaralda	1668	4.88	-75.63	1/1/97	1/1/15	
_220_1139	TRMM	Villamaría	Caldas	4169	4.88	-75.38	1/1/97	1/1/15	
_220_1140	TRMM	Murillo	Tolima	2422	4.88	-75.13	1/1/97	1/1/15	
_220_1141	TRMM	Lérida	Tolima	282	4.88	-74.88	1/1/97	1/1/15	
_220_1142	TRMM	San Juan De Rioseco	Cundinamarca	1673	4.88	-74.63	1/1/97	1/1/15	
_221_1136	TRMM	San José Del Palmar	Chocó	3173	5.13	-76.13	1/1/97	1/1/15	
_221_1137	TRMM	Viterbo	Caldas	1142	5.13	-75.88	1/1/97	1/1/15	
_221_1138	TRMM	Manizales	Caldas	935	5.13	-75.63	1/1/97	1/1/15	
_221_1139	TRMM	Manizales	Caldas	3554	5.13	-75.38	1/1/97	1/1/15	
_221_1140	TRMM	Fresno	Tolima	1555	5.13	-75.13	1/1/97	1/1/15	
_221_1141	TRMM	Amero (Guayabal)	Tolima	396	5.13	-74.88	1/1/97	1/1/15	
_221_1142	TRMM	Guaduas	Cundinamarca	1069	5.13	-74.63	1/1/97	1/1/15	
_222_1136	TRMM	Pueblo Rico	Risaralda	1168	5.38	-76.13	1/1/97	1/1/15	
_222_1137	TRMM	Mistrató	Risaralda	2090	5.38	-75.88	1/1/97	1/1/15	
_222_1138	TRMM	Riosucio	Caldas	995	5.38	-75.63	1/1/97	1/1/15	
_222_1139	TRMM	Salamina	Caldas	2887	5.38	-75.38	1/1/97	1/1/15	
_222_1140	TRMM	Pensilvania	Caldas	1979	5.38	-75.13	1/1/97	1/1/15	
_222_1141	TRMM	Victoria	Caldas	377	5.38	-74.88	1/1/97	1/1/15	
_222_1142	TRMM	Guaduas	Cundinamarca	373	5.38	-74.63	1/1/97	1/1/15	
_223_1136	TRMM	Bagadó	Chocó	1904	5.63	-76.13	1/1/97	1/1/15	
_223_1137	TRMM	Jardín	Antioquia	1582	5.63	-75.88	1/1/97	1/1/15	
_223_1138	TRMM	Valparaíso	Antioquia	1299	5.63	-75.63	1/1/97	1/1/15	
_223_1139	TRMM	Sonsón	Antioquia	1691	5.63	-75.38	1/1/97	1/1/15	
_223_1140	TRMM	Nariño	Antioquia	1174	5.63	-75.13	1/1/97	1/1/15	
_223_1141	TRMM	Norcasia	Caldas	612	5.63	-74.88	1/1/97	1/1/15	
_223_1142	TRMM	Puerto Salgar	Cundinamarca	163	5.63	-74.63	1/1/97	1/1/15	
_224_1136	TRMM	El Carmen	Chocó	1967	5.88	-76.13	1/1/97	1/1/15	
_224_1137	TRMM	Tarso	Antioquia	1525	5.88	-75.88	1/1/97	1/1/15	
_224_1138	TRMM	Fredonia	Antioquia	972	5.88	-75.63	1/1/97	1/1/15	
_224_1139	TRMM	Abejorral	Antioquia	2523	5.88	-75.38	1/1/97	1/1/15	
_224_1140	TRMM	Sonsón	Antioquia	1177	5.88	-75.13	1/1/97	1/1/15	
_224_1141	TRMM	San Francisco	Antioquia	504	5.88	-74.88	1/1/97	1/1/15	
_224_1142	TRMM	Puerto Boyacá	Boyacá	159	5.88	-74.63	1/1/97	1/1/15	
_225_1136	TRMM	Urrao	Antioquia	2465	6.13	-76.13	1/1/97	1/1/15	
_225_1137	TRMM	Concordia	Antioquia	1161	6.13	-75.88	1/1/97	1/1/15	
_225_1138	TRMM	La Estrella	Antioquia	1766	6.13	-75.63	1/1/97	1/1/15	
_225_1139	TRMM	Rionegro	Antioquia	2134	6.13	-75.38	1/1/97	1/1/15	
_225_1140	TRMM	Granada	Antioquia	1738	6.13	-75.13	1/1/97	1/1/15	
_225_1141	TRMM	San Carlos	Antioquia	1037	6.13	-74.88	1/1/97	1/1/15	
_225_1142	TRMM	Puerto Nare	Antioquia	131	6.13	-74.63	1/1/97	1/1/15	

Tabla 37. Estaciones de Temperatura.

Estación	Entidad	Municipio	Departamento	Altura	Lat.	Long.	Reg. Des	Reg. Has	Faltantes
El Rosario	Cenicafé	Venecia	Antioquia	1635	5.96	-75.71	1/1/67	31/12/14	0%
La Cristalina	Cenicafé	Támesis	Antioquia	775	5.71	-75.67	15/1/96	31/12/14	4%

Estación	Entidad	Municipio	Departamento	Altura	Lat.	Long.	Reg. Des	Reg. Has	Faltantes
Miguel Valencia	Cenicafé	Jardín	Antioquia	1621	5.6	-75.85	4/5/56	31/5/12	0%
Agronomía	Cenicafé	Manizales	Caldas	2088	5.06	-75.5	1/1/56	31/12/14	4%
Almacafe letras	Cenicafé	Manizales	Caldas	3684	5.05	-75.33	1/1/03	31/12/14	0%
Cenicafé	Cenicafé	Chinchiná	Caldas	1310	5	-75.6	1/1/51	31/12/14	0%
Granja Luker	Cenicafé	Palestina	Caldas	1031	5.07	-75.68	1/1/72	31/12/14	0%
Llanadas	Cenicafé	Manzanares	Caldas	1463	5.2	-75.13	1/4/56	31/12/98	32%
Naranjal	Cenicafé	Chinchiná	Caldas	1381	4.97	-75.65	1/1/56	31/12/14	0%
Planalto	Cenicafé	Manizales	Caldas	1413	4.99	-75.59	6/1/94	31/12/14	0%
Rafael Escobar	Cenicafé	Supia	Caldas	1307	5.46	-75.64	1/1/82	31/3/05	0%
Santa Helena	Cenicafé	Marquetalia	Caldas	1395	5.32	-75	1/1/81	31/12/14	1%
Santágueda	Cenicafé	Palestina	Caldas	1026	5.07	-75.67	1/5/65	31/12/14	0%
Montelibano	Cenicafé	Yacopí	Cundinamarca	1365	5.45	-74.33	1/1/71	31/12/14	0%
La Bella	Cenicafé	Calarcá	Quindío	1449	4.5	-75.67	1/1/51	31/12/14	27%
Paraguaitico	Cenicafé	Buenavista	Quindío	1203	4.4	-75.73	1/1/63	31/12/14	0%
El Cedral	Cenicafé	Pereira	Risaralda	2120	4.7	-75.53	1/1/61	31/12/14	12%
El Jazmín	Cenicafé	Santa Rosa de Cabal	Risaralda	1635	4.91	-75.62	1/1/75	31/12/14	1%
La Catalina	Cenicafé	Pereira	Risaralda	1321	4.75	-75.74	1/1/87	31/12/14	0%
Chapetón	Cenicafé	Ibagué	Tolima	1353	4.47	-75.27	1/1/55	31/12/14	19%
La Trinidad	Cenicafé	Libano	Tolima	1456	4.9	-75.03	1/1/76	31/12/14	0%
Albania	IDEAM	Mariquita	Tolima	500	5.28	-74.9	1/5/87	31/12/09	7%
Aeropuerto La Nubia	IDEAM	Manizales	Caldas	2058	5.03	-75.47	1/5/81	31/10/14	28%
Aeropuerto Mariquita	IDEAM	Mariquita	Tolima	475	5.21	-74.89	1/11/77	31/7/09	43%
Aeropuerto Matecana	IDEAM	Pereira	Risaralda	1342	4.8	-75.73	24/12/78	13/6/12	8%
Apto Santágueda	IDEAM	Palestina	Caldas	933	5.08	-75.68	1/2/79	30/9/89	22%
Bellavista	IDEAM	Anserma	Caldas	1932	5.27	-75.8	1/12/78	31/10/15	25%
La Esperanza Honda	IDEAM	Honda	Tolima	222	5.26	-74.73	1/1/78	31/12/09	11%
Las Brisas	IDEAM	Villamaría	Caldas	4150	4.9	-75.35	13/10/81	29/11/14	27%
La Pelada	IDEAM	Aguadas	Caldas	2180	5.57	-75.33	14/11/96	31/8/15	23%
San Félix	IDEAM	Salamina	Caldas	2696	5.37	-75.37	1/1/83	31/7/15	11%
Florencia	IDEAM	Samaná	Caldas	1575	5.53	-75.05	1/8/78	31/12/83	34%
Cocorná	Cenicafé	Cocorná	Antioquia	1344	6.06	-75.19	1/1/97	31/12/14	0%
El Agrado	Cenicafé	Montenegro	Quindío	1275	4.52	-75.8	1/1/87	31/12/14	0%
El Trapiche	Cenicafé	Bolívar	Antioquia	1277	5.8	-76.01	1/1/97	29/2/12	0%
Maracay	Cenicafé	Quimbaya	Quindío	1402	4.6	-75.73	12/6/82	31/12/14	0%

Tabla 38. Estaciones humedad relativa.

Estación	Entidad	Municipio	Departamento	Altura	Lat.	Long.	Reg. Des.	Reg. Has.	Faltantes
Agronomía	Cenicafé	Manizales	Caldas	2088	5.06	-75.5	1/1/56	31/12/14	4%
Granja Luker	Cenicafé	Palestina	Caldas	1031	5.07	-75.68	1/1/72	31/12/14	3%
El Rosario	Cenicafé	Venecia	Antioquia	1635	5.96	-75.71	1/1/71	31/12/14	0%
La Cristalina	Cenicafé	Támesis	Antioquia	775	5.71	-75.67	1/1/97	31/12/14	4%
Miguel Valencia	Cenicafé	Jardín	Antioquia	1621	5.6	-75.85	1/1/71	31/5/12	0%

Estación	Entidad	Municipio	Departamento	Altura	Lat.	Long.	Reg. Des.	Reg. Has.	Faltantes
Almacafe letras	Cenicafé	Manizales	Caldas	3684	5.05	-75.33	1/1/03	31/12/14	0%
Cenicafé	Cenicafé	Chinchiná	Caldas	1310	5	-75.6	1/1/50	31/12/14	0%
Llanadas	Cenicafé	Manzanares	Caldas	1463	5.2	-75.13	1/4/56	31/12/98	55%
Naranjal	Cenicafé	Chinchiná	Caldas	1381	4.97	-75.65	1/1/71	31/12/14	0%
Planalto	Cenicafé	Manizales	Caldas	1413	4.98	-75.58	6/1/94	31/12/14	0%
Rafael Escobar	Cenicafé	Supia	Caldas	1307	5.46	-75.64	1/1/71	31/3/05	5%
Santa Helena	Cenicafé	Marquetalia	Caldas	1395	5.32	-75	1/1/81	31/12/14	1%
Santágueda	Cenicafé	Palestina	Caldas	1026	5.07	-75.67	1/5/65	31/12/14	2%
Montelibano	Cenicafé	Yacopí	Cundinamarca	1365	5.45	-74.33	1/1/71	31/12/14	0%
La Bella	Cenicafé	Calarcá	Quindío	1449	4.5	-75.67	12/5/76	31/12/14	0%
Paraguaquito	Cenicafé	Buenavista	Quindío	1203	4.4	-75.73	1/1/71	31/12/14	0%
El Cedral	Cenicafé	Pereira	Risaralda	2120	4.7	-75.53	1/1/71	31/12/14	3%
El Jazmín	Cenicafé	Santa Rosa de Cabal	Risaralda	1635	4.91	-75.62	1/1/75	31/12/14	2%
La Catalina	Cenicafé	Pereira	Risaralda	1321	4.75	-75.74	1/1/87	31/12/14	0%
Ospirma	Cenicafé	Guatica	Risaralda	1661	5.33	-75.81	1/1/96	31/12/14	0%
Chapetón	Cenicafé	Ibagué	Tolima	1353	4.47	-75.27	1/1/71	31/12/14	27%
La Trinidad	Cenicafé	Libano	Tolima	1456	4.9	-75.03	1/1/77	31/12/14	0%
Apto La Nubia	IDEAM	Manizales	Caldas	2058	5.03	-75.47	1/5/81	31/10/14	29%
Apto Santágueda	IDEAM	Palestina	Caldas	933	5.08	-75.68	5/2/79	30/9/89	25%
Las Brisas	IDEAM	Villamaría	Caldas	4150	4.9	-75.35	13/10/81	29/11/14	29%
La Pelada	IDEAM	Aguadas	Caldas	2180	5.57	-75.33	14/11/96	31/8/15	24%
San Félix	IDEAM	Salamina	Caldas	2696	5.37	-75.37	1/2/79	31/7/15	15%
Bellavista	IDEAM	Anserma	Caldas	1932	5.27	-75.8	1/12/78	31/10/15	26%
Florencia	IDEAM	Samaná	Caldas	1575	5.53	-75.05	1/8/78	31/12/83	34%
Cocorná	Cenicafé	Cocorná	Antioquia	1344	6.06	-75.19	1/1/97	31/12/14	0%
El Agrado	Cenicafé	Montenegro	Quindío	1275	4.52	-75.8	1/1/87	31/12/14	0%
El Trapiche	Cenicafé	Bolívar	Antioquia	1277	5.8	-76.01	1/1/97	29/2/12	0%
Maracay	Cenicafé	Quimbaya	Quindío	1402	4.77	-75.73	1/1/90	31/12/14	0%

Tabla 39. Estaciones brillo solar.

Estación	Entidad	Municipio	Departamento	Altura	latitud	longitud	Reg. des	Reg. Has.	Faltantes
El Rosario	Cenicafé	Venecia	Antioquia	1635	5.96	-75.71	1/1/67	31/12/14	0%
La Cristalina	Cenicafé	Támesis	Antioquia	775	5.71	-75.67	1/1/97	31/12/14	4%
Miguel Valencia	Cenicafé	Jardín	Antioquia	1621	5.6	-75.85	1/5/56	31/5/12	5%
Agronomía	Cenicafé	Manizales	Caldas	2088	5.06	-75.5	1/1/56	31/12/14	6%
Almacafe letras	Cenicafé	Manizales	Caldas	3684	5.05	-75.33	1/1/03	31/12/14	0%
Cenicafé	Cenicafé	Chinchiná	Caldas	1310	5	-75.6	1/1/61	31/12/14	0%
Granja Luker	Cenicafé	Palestina	Caldas	1031	5.07	-75.68	1/1/75	31/12/14	0%
Llanadas	Cenicafé	Manzanares	Caldas	1463	5.2	-75.13	1/4/56	31/12/79	4%
Naranjal	Cenicafé	Chinchiná	Caldas	1381	4.97	-75.65	1/1/56	31/12/14	11%
Rafael Escobar	Cenicafé	Supia	Caldas	1307	5.46	-75.64	1/1/71	31/12/04	6%
Santa Helena	Cenicafé	Marquetalia	Caldas	1395	5.32	-75	1/1/81	31/12/14	1%
Santágueda	Cenicafé	Palestina	Caldas	1026	5.07	-75.67	1/1/68	31/12/14	5%

Estación	Entidad	Municipio	Departamento	Altura	latitud	longitud	Reg. des	Reg. Has.	Faltantes
Montelibano	Cenicafé	Yacopí	Cundinamarca	1365	5.45	-74.33	1/8/59	31/12/14	1%
La Bella	Cenicafé	Calarcá	Quindío	1449	4.5	-75.67	1/1/76	31/12/14	1%
Paraguacito	Cenicafé	Buenavista	Quindío	1203	4.4	-75.73	1/1/63	31/12/14	0%
El Cedral	Cenicafé	Pereira	Risaralda	2120	4.7	-75.53	1/1/61	31/12/14	11%
El Jazmín	Cenicafé	Santa Rosa de Cabal	Risaralda	1635	4.91	-75.62	1/1/75	31/12/14	1%
La Catalina	Cenicafé	Pereira	Risaralda	1321	4.75	-75.74	1/1/87	31/12/14	0%
Ospirma	Cenicafé	Guatica	Risaralda	1661	5.33	-75.81	1/1/96	31/12/14	0%
Chapetón	Cenicafé	Ibagué	Tolima	1353	4.47	-75.27	1/1/56	31/12/14	20%
La Trinidad	Cenicafé	Libano	Tolima	1456	4.9	-75.03	1/1/76	31/12/14	0%
Aeropuerto La Nubia	IDEAM	Manizales	Caldas	2058	5.03	-75.47	2/1/79	31/10/14	23%
Apto Santágueda	IDEAM	Palestina	Caldas	933	5.08	-75.68	1/2/79	31/12/87	18%
Bellavista	IDEAM	Anserma	Caldas	1932	5.27	-75.8	1/4/79	30/9/15	20%
Las Brisas	IDEAM	Villa María	Caldas	4150	4.9	-75.35	1/1/82	30/11/14	38%
San Félix	IDEAM	Salamina	Caldas	2696	5.37	-75.37	1/2/79	31/12/13	16%
Cocorná	Cenicafé	Cocorná	Antioquia	1344	6.06	-75.19	1/1/97	31/12/14	0%
El Trapiche	Cenicafé	Bolívar	Antioquia	1277	5.8	-76.01	14/11/96	29/2/12	0%
La Elvira	Cenicafé	Belén de Umbría	Risaralda	1540	5.18	-75.87	1/7/95	31/12/14	0%

Tabla 40. Estaciones de caudal.

Estación	Entidad	Municipio	Departamento	Altura	lat.	long.	Reg. Des.	Reg. Has.	Faltantes
Chupaderos	IDEAM	Manizales	Caldas	1998	5.02	-75.47	1/1/88	31/12/10	0%
El Retiro	IDEAM	Palestina	Caldas	838	5.12	-75.67	1/10/71	31/12/13	3%
Irra	IDEAM	Neira	Caldas	745	5.27	-75.65	1/1/72	31/12/13	1%
La Bananera	IDEAM	Pereira	Risaralda	1550	4.77	-75.62	1/1/71	1/12/10	2%
La Bretaña	IDEAM	Apia	Risaralda	1134	5.05	-75.93	1/1/78	31/12/10	1%
La Esperanza	IDEAM	Mariquita	Tolima	475	5.2	-74.9	27/1/87	31/12/10	2%
La Paila	IDEAM	Neira	Caldas	800	5.22	-75.63	1/1/78	31/12/14	11%
La Paila	CHEC	Neira	Caldas	800	5.22	-75.63	1/2/71	31/12/87	30%
La Paila	CVC	Neira	Caldas	800	5.22	-75.63	1/1/86	31/12/86	8%
La Reina	IDEAM	Santa Rosa de Cabal	Risaralda	1630	4.87	-75.62	1/9/71	31/10/94	0%
Mariquita	IDEAM	Mariquita	Tolima	460	5.2	-74.92	1/1/76	31/10/85	0%
Planta Eléctrica	IDEAM	Santa Rosa de Cabal	Risaralda	1700	4.85	-75.6	28/3/96	31/12/10	14%
Playa Rica	IDEAM	Santa Rosa de Cabal	Risaralda	1685	4.75	-75.58	1/1/94	31/12/10	1%
Pte Carretera	IDEAM	Mariquita	Tolima	465	5.22	-74.88	14/3/89	31/12/10	9%
Pte Carretera Guarínó	IDEAM	Honda	Tolima	168	5.28	-74.73	1/1/80	31/12/10	14%
Pte Carretera Miel	IDEAM	Victoria	Caldas	240	5.57	-74.83	1/2/63	31/12/86	4%
Pte Carretera	IDEAM	Supia	Caldas	1185	5.45	-75.65	1/1/78	31/12/10	9%
Pte Carretera	CHEC	Supia	Caldas	1185	5.45	-75.65	1/1/69	30/9/81	55%
Pte Las Juntas	IDEAM	Neira	Caldas	860	5.23	-75.65	1/1/73	12/2/96	3%
Pte Negro	IDEAM	Belalcázar	Caldas	920	4.98	-75.85	1/5/75	31/12/10	2%
Quitassueño	IDEAM	Aguadas	Caldas	580	5.7	-75.53	1/1/74	30/5/11	1%
San Gabriel	IDEAM	Manizales	Caldas	1190	5.12	-75.55	1/1/90	10/3/05	7%
Sonson	IDEAM	Sonson	Antioquia	2282	5.68	-75.3	17/7/70	30/12/10	4%
Sucre	IDEAM	Pereira	Risaralda	1181	4.7	-75.75	1/7/78	31/12/10	5%
Sancancio	CHEC	Manizales	Caldas	1940	5.04	-75.48	1/1/80	30/11/12	7%
Montevideo	CHEC	Chinchiná	Caldas	1400	4.99	-75.56	1/9/60	30/11/12	11%
Cameguadua	CHEC	Manizales	Caldas	1358	4.99	-75.62	1/1/05	31/8/12	7%
Estrella Sobrante	CHEC	Chinchiná	Caldas	1219	4.98	-75.68	1/1/61	29/11/12	6%
Costa Azul	IDEAM	Salamina	Caldas	1420	5.35	-75.48	1/1/88	13/5/11	6%
La Herencia	IDEAM	Aguadas	Caldas	2132	5.57	-75.33	3/5/94	30/11/11	43%
Buenos Aires	IDEAM	Anserma	Caldas	1050	5.18	-75.8	1/3/66	31/12/13	6%

<i>Estación</i>	<i>Entidad</i>	<i>Municipio</i>	<i>Departamento</i>	<i>Altura</i>	<i>lat.</i>	<i>long.</i>	<i>Reg. Des.</i>	<i>Reg. Has.</i>	<i>Faltantes</i>
Buenos Aires	CHEC	Anserma	Caldas	1050	5.2	-75.8	2/3/66	31/12/76	20%
La Virgen	IDEAM	Anserma	Caldas	1243	5.23	-75.8	1/7/70	31/12/14	18%
La Virgen	CHEC	Anserma	Caldas	1243	5.23	-75.8	4/7/70	31/12/87	62%
La Chocóa	IDEAM	Sabana de Torres	Santander	100	7.4	-73.48	1/3/76	31/12/95	3%
La Enea	IDEAM	Manizales	Caldas	2030	5.03	-75.47	1/1/88	31/12/93	0%
Ruta 30	IDEA	Manizales	Caldas	2002	5.06	-75.5	1/1/09	26/7/14	6%
Chinchiná Bta	Aguas/ Mzls	Chinchiná	Caldas	2333	5.02	-75.42	4/2/08	11/11/12	4%
Cajones	Aguas/ Mzls	Chinchiná	Caldas	2293	5.02	-75.43	1/6/05	11/11/12	8%
Romerales	Aguas/ Mzls	Chinchiná	Caldas	2444	4.99	-75.43	1/6/04	11/11/12	24%
Termales	Aguas/ Mzls	Chinchiná	Caldas	2440	5	-75.44	1/6/05	31/10/12	12%
California	Aguas/ Mzls	Manizales	Caldas	2395	4.99	-75.45	1/2/08	11/11/12	3%
La María	Aguas/ Mzls	Manizales	Caldas		4.98	-75.44	1/10/10	11/11/12	0%
Pinares	Aguas/ Mzls	Manizales	Caldas		5.09	-75.42	1/1/11	11/11/12	25%
Rio Blanco	Aguas/ Mzls	Manizales	Caldas		5.09	-75.41	1/1/11	11/11/12	25%
El Gallinazo	GENSA						12/7/97	25/11/02	34%
La Tebaida	GENSA						1/1/71	31/10/02	1%
Pte. Hierro	GENSA						1/1/93	31/10/02	0%
Pte. Samaná	GENSA						1/1/71	31/10/02	2%
Q. Moro	GENSA						1/1/65	25/11/02	35%
Q. Pensil- La Tebaida	GENSA						1/9/72	31/10/02	31%

Bibliografía

- AGUAS DE MANIZALES. (2016). *Diagnóstico general de las Cuencas*. Manizales.
- Amaya, G., Restrepo Tamayo, C., Vélez, M. V., Vélez, J. I., & Álvarez, O. (2009). Modelación del comportamiento hidrológico de tres cuencas en el Urabá Antioqueño - Colombia. *Avances en Recursos Hidráulicos - No. 19*, 18.
- AMVA. (2003). *Convenio 366. Diseño y puesta en marcha de la red de monitoreo ambiental en la cuenca hidrográfica del río Medellín en jurisdicción del Área Metropolitana*. Medellín: Área Metropolitana del Valle de Aburrá.
- ANA. (2016). OBSERVATORIO NACIONAL DE SEQUÍA. *OBSERVATORIO NACIONAL DE SEQUÍA* (pág. 14). Bruselas: MINAM - MINAGRI.
- Australian Government Bureau of Meteorology. (2017). *Climate Scales*. Sydney: AG.
- Baker, J. A. (1960). *Wetland and Water Supply*. Washington D.C. : Geological Survey - United States Department of the Interior.
- Bonaccorso, B., Bordi, I., Rossi, G., & Sutera, A. (2003). Spatial Variability of Drought: An análisis of the SPI in Sicily. *Water Resources Management*, 25.
- Bordi, I., & otros. (2005). Methods for predicting drought occurrences. *ResearchGate*, 13.
- Brewer, M. J., & Heim Jr, R. R. (2011). The Global Drought Monitor Portal. (NOAA, Ed.) *Drought Mitigation Center Faculty Publications*, 55.
- Byun, H. R., & Wilhite, D. A. (1999). Objective Quantification of Drought Severity and Duration. *National Drought Mitigation Center - University of Nebraska*, 11.
- Cancelliere, A., Di Mauro, G., Bonaccorso, B., Rossi, G., , , y otros. (2007). Drought forecasting using the Standardized Precipitation Index. *Water Resour Manage*, 20.
- CAZALAC. (2015). *Drought and Arid Atlas*. Obtenido de <http://www.climatedatalibrary.cl/CAZALAC/maproom/>

- CAZALAC. (2015). *Guía metodológica para la aplicación del Análisis Regional de Frecuencias de Sequías basado en L-momentos y resultados de aplicación en América Latina*. Montevideo, Uruguay: UNESCO.
- CGIAR. (2016). *The drought crisis in the Central Highlands of Vietnam*. Kon Tum, Gia Lai, Dak Lak, Vietnam.: Assessment Report.
- Cheng, H., Hu, Y., & Zhao, J. (2009). Meeting China's Water Shortage Crisis: Current Practices and Challenges. *Environmental Science & Technology feature*, 5.
- CINARA - UTP. (2011). *Guía metodológica para aplicar el modelo para la Gestión Integrada del Recurso Hídrico en cuencas hidrográficas*. Cali: CINARA - UTP.
- CORPOCALDAS. (2010). *Cuantificación Caudales Fuentes Hídricas Superficiales Caldas*. Manizales: CORPOCALDAS.
- CORPOCALDAS. (2012). *POMCA Río Chinchiná*. Manizales: Corporación Autónoma de Caldas.
- CORPOCALDAS. (2015). *Aplicación de la estrategia para la implementación de la Evaluación Regional del Agua - ERA en jurisdicción del departamento de Caldas*. Manizales: CORPOCALDAS.
- CORPOCALDAS. (2016). *Boletín N° 25 Informe final desabastecimiento hídrico Fenómeno de "El Niño" 2015 - 2016*. Manizales: Corporación Autónoma de Caldas.
- CORPOCALDAS, & Velásquez, S. (2015). Variabilidad y cambio climático., (pág. 15). Manizales.
- CORPOCALDAS; GOTTA Ingeniería. (2017). *ESTIMACIÓN DEL INDICADOR DE SEQUÍA PARA DETERMINAR ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO EN LA JURISDICCIÓN DE CORPOCALDAS COMO INSUMO PARA INCORPORACIÓN DE CAMBIO CLIMÁTICO EN EL ORDENAMIENTO DE CUENCAS Y PLANES DE MANEJO*. Manizales: CORPOCALDAS.
- Department of Geophysics, University of Oslo. (2000). Assessment of the Regional Impact of Drought in Europe. En ARIDE, *Drought Event Definition* (pág. 45). Oslo, Norway: H. Hisdal and L. M. Tallaksen.
- Dracup, J. A., Lee, K. S., & Paulson, E. G. (1980). On the Definition of Droughts. *Water Resources Research, Vol 16*, 6.

- ENHANCE. (2016). *Novel Multi-Sector Partnerships in Disaster Risk Management*. Bruselas: ENHANCE project.
- FAO. (2009). *Análisis de Sistemas de Gestión del Riesgo de Desastres*. Roma, Italia: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación FAO.
- FAO. (2010). *GESTIÓN DEL RIESGO DE SEQUÍA Y OTROS EVENTOS CLIMÁTICOS EXTREMOS EN CHILE Estudio piloto sobre vulnerabilidad y la Gestión Local del Riesgo*. Coquimbo: FAO.
- FAO. (2013). *Afrontar la escasez de agua - Un marco de acción para la agricultura y la seguridad alimentaria*. Roma, Italia: FAO.
- Fernandez, B. (1997). Identificación y caracterización de sequías hidrológicas en Chile central. *Ingeniería del agua Vol 4. Num 4.*, 10.
- Fernandez, B. (1998). *Risk of scarcity of monthly precipitation and streamflows in semiarid regions*.
- Fernandez, B., & Salas, J. D. (1999). Return Period and Risk of Hydrologic Events. II: Applications. *Journal of Hydrologic Engineering*, 9.
- Fernandez, B., Donoso, G., Luraschi, M., Orphanópoulos, D., & Salazar, C. (1999). ESTIMACION DEL IMPACTO ECONÓMICO ASOCIADO A SEQUÍAS HIDROLÓGICAS. En P. U. PUC. Santiago de Chile: CONAPHI Chile.
- Francés, F., Vélez U, J. I., & Vélez U, J. J. (2007). Split parameter structure for the automatic calibration of distributed hydrological models. *Journal of Hydrology*, 14.
- Frey, H. (2016). Climate Change & Environment. *The El Niño phenomenon and related impacts* (pág. 12). Zurich: Department of Geography, University of Zurich),.
- Gómez Serna, J., Ochoa, A., & Poveda, G. (2016). *VARIABILIDAD ESPACIO-TEMPORAL DEL ÍNDICE DE PRECIPITACIÓN ESTANDARIZADO (SPI) EN CENTRO Y SERUAMÉRICA Y EL CARIBE*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.
- Gonzalez L, F. A. (2010). *Hidroclimatología del departamento de Caldas*. Manizales: UNAL.
- Gonzalez, J., & Marco, J. B. (2005). *Caracterización estocástica de la realización espacio-temporal de eventos hidrológicos extremos de sequías*. Valencia, España: UPV, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente.

- Hashimoto, T., Stendinger, J. R., & Loucks, D. P. (1982). Reliability, Resiliency and Vulnerability Criteria For Water Resources System Performance Evaluation. *Water Resources Research*, 7.
- Hayes, M. J., Knutson, C. L., & Hu, Q. S. (2005). Multiple-Year Droughts In Nebraska. *Drought Mitigation Center Faculty Publications, University of Nebraska*, 5.
- Hayes, M. J., Svoboda, M. D., Wardlow, B. D., Anderson, M. C., Kogan, F., & . (2012). Drought Monitoring: Historical and Current Perspectives. *Remote Sensing of Drought: Innovative Monitoring Approaches*, 21.
- Hayes, M., Svodova, M., & Wilhite, D. A. (2000). Monitoring Drought Using the Standarized Precipitation Index. En *A Global Assesment* (pág. 13). Lincoln: University of Nebraska.
- IAGUA - Locken. (2016). *iagua.es*. Recuperado el 2017, de <http://www.iagua.es/noticias/locken/17/02/08/pioneros-agua-historia>
- IDEAM. (1997). *POSIBLES EFECTOS NATURALES Y SOCIOECONÓMICOS DEL FENÓMENO EL NIÑO EN EL PERIODO 1997-1998 EN COLOMBIA*. Bogotá D.C.: Centro de documentación.
- IDEAM. (2005). *Atlas climatológico de Colombia*. Bogotá D.C.: Imprenta Nacional.
- IDEAM. (2007). *Modelo institucional del IDEAM sobre el efecto climático de los fenómenos El Niño y La Niña en Colombia*. Bogotá D.C.: Centro de Documentación IDEAM.
- IDEAM. (2009). *ESTUDIO DE LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA DE LA PRECIPITACIÓN EN COLOMBIA ASOCIADA A PROCESOS OCEANICOS Y ATMOSFÉRICOS DE MESO Y GRAN ESCALA*. Bogotá D.C.: IDEAM, Subdirección de Meteorología.
- IDEAM, & Hurtado, G. (2012). *SEQUÍA METEOROLÓGICA Y SEQUÍA AGRÍCOLA EN COLOMBIA: INCIDENCIA Y TENDENCIAS*. Bogotá D.C.: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- IDEAM, MINAMBIENTE. (2015). *Estudio Nacional del Agua 2014*. Bogotá D.C.: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- IDEAM, PNUD, MADS, DNP, CANCELLERIA. (2015). *Nuevos Escenarios de Cambio Climático para Colombia 2011-2100 - Herramientas científicas para la toma de decisiones. Tercera Comunicación NAcional de Cambio Climático*. Bogotá D.C.: MADS - IDEAM.

- IPCC. (2013). CAMBIO CLIMÁTICO. *WGI Technical Support Unit* (pág. 2). Berna: University of Bern.
- IPCC. (2014). *Cambio climático 2014 - Informe de síntesis*. Berna.
- IPCC, OMM, PNUMA. (2013). *Cambio climático 2013 - Bases físicas*. Grupo Intergubernamental de expertos sobre el cambio climático.
- IRIMO. (2013). *Implementation of Drought Early-Warning System over IRAN DESIR*. Mashad: CFCS.
- Jaramillo Robledo, Á. (2016). El clima y las montañas., (pág. 10). Manizales.
- Jaramillo, Á. (2005). Clima andino y café en Colombia. *Cenicafé*, 16.
- Keyantash, J., & Dracup, J. A. (2002). The Quatification of Drought: An Evaluation of Drought Indices. *AMERICAN METEOROLOGICAL SOCIETY*, 14.
- La Cruz, L. (2010). The impact of droughts and water management on various hydrological systems in the headwaters of the Tagus River (central Spain). *Journal of Hydrology*, 386, 14.
- Lorenzo, J., Vicente, S. M., López Moreno, J. I., Beguería, S., Garcia R., J. M., Cuadrat, J. M., y otros. (2010). The impact of droughts and water management on various hydrological systems in the headwaters of the Tagus River (central Spain). *Journal of Hydrology* 386, 14.
- Madden, R., & Julian, P. (1972). *Description of global-scale circulation cells in the tropics with 40-50 day*. Journal of atmospheric Science.
- Marulanda A, A., Fonseca T, O. A., Vélez U, J. J., & Cardona A, O. D. (2016). Hydrological study of the potential effects of the melting of Nevado del Ruiz glacier on ruban growth zones in Manizales, Colombia. *Hydrological Science Journal*, 15.
- MAVDT. (2005). *Plan de Acción Nacional para la Lucha contra la Desertificación y la Sequía en Colombia*. Bogotá, Colombia: MAVDT.
- MAVDT. (2010). *Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico*. Bogotá D.C.: MAVDT.
- McKee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration of time scales. Eighth Conference on Applied Climatology. *American Meteorological Society*, 179-186.

- MINAM, Ministerio del Ambiente, Perú. (2016). *Estrategia nacional de lucha contra la desertificación y la sequía 2016-2030*. Lima, Perú: VMUERN, MINAM.
- MINAMBIENTE. (2005). *PLAN DE ACCION Lucha contra la Desertificación y la Sequía en Colombia*. Bogotá D.C.: IDEAM.
- MINAMBIENTE. (26 de mayo de 2015). *Decreto 1076*.
- Monzonís, M., Solera, A., Ferrer, J., Estrela, T., Paredes Arquiola, J., , y otros. (2015). A review of water scarcity and drought indexes in water resources planning and management. *Journal of Hydrology*, 12.
- Morid, S., Smakhtin, V., & Moghaddasi, M. (2006). Comparison of seven meteorological indices for Drought monitoring in Iran. *INTERNATIONAL JOURNAL OF CLIMATOLOGY*, 15.
- NASA. (2016). *SPI Standardized Precipitation Index*. Obtenido de <https://gmao.gsfc.nasa.gov/research/subseasonal/atlas/SPI-html/>
- NOAA. (2015). *Climate Prediction Center*. Washington D.C.: National Weather Service.
- Null (CCM), J. (2017). *Golden Gate Weather Services*. Recuperado el 2017, de <http://ggweather.com/enso/oni.htm>
- Ocampo López, O. (2017). *Modelación hidrológica y agronómica de los efectos del cambio y la variabilidad climática en la producción cafetera de Caldas*. Manizales: Universidad Nacional de Colombia.
- Ocampo, O. L., & Vélez, J. J. (2013). Análisis comparativo de modelos hidrológicos de simulación continua en cuencas de alta montaña: caso del Río Chinchiná. *Revista de Ingenierías - Universidad de Medellín*, 16.
- OMM. (1994). *Guía de Prácticas Hidrológicas*. OMM-No 168.
- OMM. (2012). *Glosario Hidrológico Internacional*. Geneve: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization.
- OMM. (2012). *Índice normalizado de precipitación. Guía de usuario*. Ginebra, Suiza: OMM-No 1090.
- OMM. (2013). *Resumen de conclusiones y cifras actualizadas sobre el cambio climático*. Ginebra, Suiza.

- Ortega Gaucin, D. (2013). Sequía: causas y efectos de un fenómeno global. *Ciencia y Sociedad UANL*, 9.
- Palmer, W. C. (1965). Meteorological drought. *Office of Climatology research paper no. 45, U.S. Weather*, 58.
- Pavelic, P., Karthikeyan, B., Amarnath, G., Eriyagama, N., Muthuwatta, L., Smakhtin, V., y otros. (2015). Controlling Floods and Droughts through Underground Storage: Form Concept to Pilot Implementation in the Ganges River Basin. *IWMI Research Report*, 38.
- Pielke Sr, R. A., Salas, J. D., & Lukas, J. (2005). *Drought 2002 in Colorado: An Unprecedented Drought or a Routine Drought?* Colorado: Pure and Applied Geophysics.
- Poveda J, G., Vélez U, J. I., Mesa S, Ó. J., Ceballos B, L. I., Zuluaga A, M. D., & Hoyos O, C. (2002). Estimación de caudales mínimos para Colombia mediante regionalización y aplicación de la curva de recesión de caudales. *Meteorología Colombiana*, 8.
- RAE. (2017). <http://www.rae.es/>. Recuperado el 2017, de <http://www.rae.es/>
- Rangecroft, S., Van Loon, A. F., Maureira, H., Verbist, K., Hannah, D. M., & . (2016). Multi-method assessment of reservoir effects on hydrological droughts in an arid region. *Journal Earth System Dynamics*, 32.
- Rossi, G., & Cancelliere, A. (2012). Managing drought risk in water supply systems in Europe: a review. *International Journal of Water Resources Development*, 19.
- Salmivaara, A., Porkka, M., Kummu, M., Keskinen, M., Guillaume, J. H., & Varis, O. (2014). Exploring the Modifiable Areal Unit Problem in Spatial Water Assessments: A Case of Water Shortage in Monsoon Asia. *Water*, 20.
- Shiklomanov's, I. (1993). World fresh water resources. Peter Gleik.
- SINC. (19 de 03 de 2017). Radiografía de las sequías de los últimos 318 años en España. Madrid, España.
- Smakhtin, V. U. (2001). Low Flow Hydrology: A review. *Journal of Hydrology*, 40.
- Smakhtin, V., & Schipper, L. (2008). *Droughts: The impact of semantics and perceptions*. Sri Lanka: Water Policy.

- Smakhtin, V., & Sood, A. (2015). Global hydrological models: a review. *Hydrological Science Journal*, 19.
- Tallaksen, L. M., Madsen, H., & Clausen, B. (1997). On the definition and modelling of streamflow drought duration and deficit volume. *Hydrological Sciences Journal*, 20.
- Tarawneh, Z., & Salas, J. D. (2009). The occurrence probability and return period of extreme hydrological droughts. *Thirteenth International Water Technology Conference, IWTC*.
- Tejedor, E., de Luis, M., Cuadrat, J. M., Esper, J., Ángel Saz, M., , y otros. (2016). Tree-ring-based drought reconstruction in the Iberian Range (east of Spain) since 1694. *International Journal of Biometeorology*, 11.
- Trnka, M., Dubrovsky, M., Svodoba, M. D., Semerádová, D., Hayes, M., Zalud, Z., y otros. (2008). Developing a Regional Drought Climatology for the Czech Republic. *International Journal of Climatology*, 44.
- UNCCD. (2009). *Water scarcity and desertification*. Born, Germany: www.unccd.int.
- UNCCD. (2011). *Desertification*. Grecia: Zoi Environment.
- UNESCO - UNCCD. (1997). Aprendiendo a luchar contra la desertificación. *Guía educativa para el maestro*. Italia y Suiza: UNCCD.
- UNESCO - WMO. (1985). *Hydrological aspects of drought*. Geneva: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization.
- UNESCO. (2002). *Coping with water scarcity*. Paris: IHP-VI, Technical Documents in Hydrology.
- UNESCO. (2014). *INTERNATIONAL DROUGHT INITIATIVE*. TEHRAN, IRAN: REGIONAL CENTRE ON URBAN WATER MANAGEMENT.
- UNESCO. (2014). *LAFDM TUTORIAL*. Lincoln, Nebraska: Princeton.
- UNESCO. (2016). *AGUA Y EMPLEO*. Paris, Francia.: World Water Assesment Programme - UN.
- UNESCO. (2016). *Managing Water Resources in Arid and Semi Arid Regions of Latin America and Caribbean*. MWAR-LAC, Division of water sciences. Paris: International Hydrological Programme IHP.

- UNGRD. (2015). *Plan Nacional de Contingencia frente al Fenómeno del Niño*. Bogotá D.C.: UNGRD.
- UNGRD. (2016). *Fenómeno El Niño - Análisis comparativo 1997-1998/2014-2016*. Bogotá D.C.: UNGRD.
- United Nations Development Programme. (2012). *DROUGHT RISK MANAGEMENT: PRACTITIONER'S PERSPECTIVES FROM ÁFRICA AND ASIA*. New York: United Nations Office at Nairobi,.
- USGS. (2005). *The drought of 1998-2002 in North Carolina - Precipitation and Hydrologic Conditions*. Virginia, Ca: U.S. Department of the Interior.
- USGS. (2016). *Drought*. Sunrise Valey Dr, Virginia: U.S. Geological Survey, Water Resources Division.
- Van Loon, A. F. (2015). Hydrological drought explained. *WIREs Water*, 34.
- Van Loon, A. F., & Laaha, G. (2015). Hydrological drought severity explained by climate and catchment Characteristics. *Journal of Hydrology*, 12.
- Vélez, J. I. (2001). Desarrollo de un modelo hidrológico conceptual y distribuido orientado a la simulación de las crecidas. *Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Valencia*.
- Vicente Serrano, S. M., Beguería, S., Lorenzo Lacruz, J., Camarero, J. J., López Moreno, J. I., Azorin Molina, C., y otros. (2012). Performance of Drought Indices for Ecological, Agricultural, and Hydrological Applications. *Journal American Meteorological Society*, 40.
- Vicente, S. M., López Moreno, J. I., Drummond, A., Gimeno, L., Morán Tejeda, E., Lorenzo Lacruz, J., y otros. (2011). ANALYSIS OF THE POSSIBLE IMPACTS OF WARMING PROCESSES ON DROUGHT AND WATER RESOURCES IN THE NORTHWESTERN IBERIAN PENINSULA (1930-2006). *Climate Research*, 12.
- Vlachos & James, Adaptado UNESCO. (1983). Drought Impacts. *Water Resources*, 30.
- Vorosmarty, C. J., Green, P., Salisbury, J., Lammers, R. B., , & . (2000). Global Water Resources: Vulnerability from Climate Change and Population Growth. *SCIENCE*, 5.
- Wassem, M., Ajmal, M., & Kim, T. W. (2015). *Development of a new composite drought index for multivariate drought assessment*. Korea: Journal of Hydrology.

- Wilhite, D. (1990). Emergency Management. Chapter 9. Drought. Lincoln, Nebraska: DigitalCommons@University of Nebraska.
- Wilhite, D. (1993). The Enigma of Drought. Lincoln: University of Nebraska.
- Wilhite, D. (2000). *Drought as a Natural Hazard: Concepts and Definitions*. Lincoln: DigitalCommons@University of Nebraska.
- Wilhite, D. (2002). Combating Drought through Preparedness. Lincoln: University of Nebraska.
- Wilhite, D. (2014). Changing the paradigm for Drought Management: Can We Break the Hydrol-Illlogical Cycle? *Drought Mitigation Center Faculty*, 6.
- Wilhite, D. A., & Glantz, M. H. (1985). Understanding the Drought Phenomenon: The Role of Definitions. *Water International*, 10.
- Wilhite, D. A., & GWP, A. (2014). *Directrices de política nacional para la gestión de sequías: Modelo para la adopción de medidas*. Ginebra: OMM.
- Wilhite, D. D. (1992). Drought. *Drought Mitigation Center Faculty Publications*, 64.
- WMO, W., & GWP, G. (2016). *Handbook of Drought Indicators and Indices*. Geneva: Integrated Drought Management Programme.
- Wu, H., Svoboda, M. D., Hayes, M. J., Wilhite, D. A., Wen, F., & . (2007). Appropriate Application of the Standardized Precipitation Index in Arid Locations and Dry Seasons. *National Drought Mitigation Center at DigitalCommons@University of Nebraska - Lincoln.*, 20.
- Xie, H., Ringler, C., Zhu, T., & Ahmad, W. (2013). Droughts in Pakistan: a spatiotemporal variability analysis using the Standardized Precipitation Index. *Water International*, 13.
- Zuluaga L, J. (2009). *Análisis de la variabilidad espacio-temporal de la sequía en Colombia*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.