

## CONTENIDO GENERAL

1	INTRODUCCIÓN .....	23
2	MARCO TEÓRICO .....	33
3	ÁREA DE ESTUDIO .....	65
4	METODOLOGÍA .....	79
5	ESTACIONARIEDAD EN LAS VARIABLES HIDROLÓGICAS .....	97
6	INFLUENCIA DEL EMBALSE EN EL RÉGIMEN DE LOS EXTREMOS HIDROLÓGICOS.....	105
7	INFLUENCIA DE FORZAMIENTOS CLIMÁTICOS EN LOS EXTREMOS HIDROLÓGICOS.....	123
8	MODELACIÓN DE LOS EXTREMOS HIDROLÓGICOS DEL RÍO CAUCA EN UN CONTEXTO DE NO ESTACIONARIEDAD.....	137
9	DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	171
10	CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.....	179
	REFERENCIAS.....	187
	ANEXOS.....	199



# CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN .....	23
1.1	Contexto .....	23
1.1.1	Modelación estadística no estacionaria .....	25
1.1.2	Inundaciones y sequías en el Valle Alto Cauca, Colombia.....	26
1.2	Motivación .....	28
1.3	Objetivos .....	28
1.4	Organización del documento .....	29
2	MARCO TEÓRICO .....	33
2.1	Cambio Climático.....	33
2.2	Variabilidad climática.....	35
2.3	Fenómenos de macroescala en Colombia .....	35
2.3.1	Fenómeno El Niño Oscilación del Sur - ENSO .....	36
2.3.2	Índices de ENSO usados en el suroccidente colombiano .....	39
2.3.1	El Niño/La Niña Modoki (ENM)/ (LNM) .....	43
2.3.2	La zona de convergencia intertropical (ZCIT).....	44
2.3.3	Corriente en chorro del Chocó – CCC .....	45
2.3.4	La oscilación cuasi bienal – QBO .....	48
2.3.5	La oscilación Atlántico Norte – NAO .....	48
2.3.6	La oscilación Decadal del Pacífico – PDO .....	48
2.4	Hipótesis de estacionariedad.....	49
2.4.1	Pruebas de independencia.....	50
2.4.2	Pruebas de homogeneidad.....	50
2.4.3	Pruebas de estacionariedad .....	50
2.5	Modelos no estacionarios de análisis de frecuencias.....	51
2.5.1	Métodos para estimar los parámetros de la distribución.....	51
2.5.2	Modelos estocásticos .....	52
2.5.3	Modelos multivariados .....	53
2.5.4	Metodologías para datos con dependencia .....	53
2.5.5	Análisis de ventanas temporales móviles .....	54
2.5.6	Metodologías para series de excedencias .....	54
2.5.7	Metodologías con distribuciones mixtas.....	54
2.5.8	Modelos de tendencia temporal.....	56
2.5.9	Modelos de covariables externas .....	56
2.6	Modelo aditivo generalizado de localización, escala y forma – gamlss .....	60
2.6.1	Estimación de los parámetros.....	61
2.6.2	Funciones de distribución .....	61

2.6.3	Funciones de suavizado .....	61
2.6.4	Sobre la selección de la combinación de covariables de cada modelo .....	63
<b>3</b>	<b>ÁREA DE ESTUDIO.....</b>	<b>65</b>
3.1	Datos hidrológicos .....	67
3.2	Datos de variabilidad climática .....	68
3.3	Hidroclimatología .....	69
3.4	Tendencias en el régimen de precipitación .....	70
3.5	Régimen de crecidas.....	72
3.6	Sequías hidrológicas.....	74
3.7	Distribución espacial de lluvia en años de eventos históricos de inundaciones y sequías.....	75
3.8	Estudios previos de modelación estadística de caudales del río Cauca.....	77
<b>4</b>	<b>METODOLOGÍA .....</b>	<b>79</b>
4.1	Información Climática e Hidrológica .....	79
4.2	Variables macroclimáticas.....	80
4.3	Análisis de estacionariedad .....	81
4.3.1	Función de auto correlación.....	82
4.3.2	Prueba Ljung-Box.....	83
4.3.3	Prueba de homogeneidad normal estándar (SNHT) .....	83
4.3.4	Prueba de Pettitt .....	83
4.3.5	Prueba de Buishand .....	84
4.3.6	Prueba de von Neumman.....	84
4.3.7	Prueba de Levene.....	84
4.3.8	Prueba Mann-Kendall.....	85
4.4	Análisis de componentes principales.....	86
4.5	El embalse y los extremos hidrológicos.....	87
4.6	Índices de embalse como señales de alteración antrópica del régimen hidrológico .....	87
4.6.1	Índice de escurrimiento medio IE1 .....	87
4.6.2	Índice de volumen almacenado IE2.....	88
4.7	Análisis de teleconexión entre extremos hidrológicos y las variables macroclimáticas .....	89
4.8	Modelación estadística de los extremos hidrológicos .....	89
4.8.1	Funciones de suavizado .....	91
4.8.2	Selección de los términos aditivos y el tipo de tendencia .....	92
4.8.3	Selección de modelos.....	92

4.8.1	Bondad de ajuste de los modelos.....	93
4.8.2	Funciones de distribución .....	93
4.9	Modelos estacionarios: M0.....	94
4.10	Modelos de tendencia temporal: M1 .....	94
4.11	Modelos de distribución mixta: M2 .....	95
4.12	Modelos de covariable: M3 y M4.....	95
4.13	Modelos de covariable como herramientas de pronóstico .....	96
5	ESTACIONARIEDAD EN LAS VARIABLES HIDROLÓGICAS .....	97
5.1	Estacionariedad en las variables hidrológicas de máximos anuales .....	97
5.1.1	Rupturas y tendencias en las crecidas anuales.....	98
5.1.2	Rupturas y tendencias en la duración de las crecidas .....	100
5.2	Estacionariedad en las variables hidrológicas de mínimos anuales.....	101
5.2.1	Rupturas y tendencias en los caudales mínimos anuales.....	101
5.2.2	Rupturas y tendencias en la duración del estiaje anual.....	103
6	INFLUENCIA DEL EMBALSE EN EL RÉGIMEN DE LOS EXTREMOS HIDROLÓGICOS.....	105
6.1	Regla de operación del embalse .....	106
6.2	Capacidad de regulación de caudales extremos.....	109
6.2.1	Retención del escurrimiento medio anual.....	109
6.2.2	Alteración del régimen de caudales extremos.....	110
6.2.3	Regulación en las crecidas históricas del río Cauca.....	112
6.2.4	Regulación en las sequías históricas.....	113
6.3	Efectos del embalse en la duración de las crecidas y estiajes anuales .....	114
6.3.1	Duración de las crecidas .....	114
6.3.1	Duración de los eventos de estiaje.....	115
6.3.2	Alcance de los objetivos de regulación para control de inundaciones y caudales bajos	116
6.4	Relación entre el volumen almacenado en el embalse y los extremos hidrológicos.....	116
6.1	Índices de embalse y los extremos hidrológicos .....	118
7	INFLUENCIA DE FORZAMIENTOS CLIMÁTICOS EN LOS EXTREMOS HIDROLÓGICOS.....	123
7.1	Alteración del régimen de caudales de crecidas y estiaje.....	125
7.1	Estacionariedad en las variables climáticas de baja frecuencia.....	126

7.2	Teleconexión entre covariables climáticas y las crecidas anuales en el río Cauca .....	129
7.1	Teleconexión entre las covariables climáticas y los caudales mínimos anuales en el río Cauca	131
7.2	Teleconexión entre las covariables climáticas y la duración de las crecidas y estiajes en el río Cauca	132
7.3	Análisis Componentes Principales de los índices climáticos.....	135
<b>8</b>	<b>MODELACIÓN DE LOS EXTREMOS HIDROLÓGICOS DEL RÍO CAUCA EN UN CONTEXTO DE NO ESTACIONARIEDAD.....</b>	<b>137</b>
8.1	M0: Modelo estacionario.....	139
8.2	M1: Modelos de tendencia temporal.....	140
8.3	M2: Modelos de distribución mixta .....	143
8.3.1	La probabilidad de ocurrencia de La Niña y los caudales máximos anuales.....	144
8.3.2	La probabilidad de ocurrencia de La Niña y los caudales mínimos anuales .....	146
8.4	M3: Modelos de covariables .....	147
8.4.1	Modelos usando solo covariables climáticas: Caso Salvajina.....	147
8.4.2	Modelos usando solo índices de embalse: Caso La Balsa .....	149
8.4.3	Modelos que usan forzamientos climáticos y antrópicos: La Balsa, Juanchito y La Victoria. 151	
8.4.4	Efecto de la variabilidad climática y operación del embalse en la distribución de la duración de eventos asociados a un umbral .....	154
8.5	M4: Modelos de Componentes Principales Climáticas .....	157
8.5.1	Modelación de las crecidas anuales .....	158
8.5.2	Modelación de los caudales mínimos anuales.....	159
8.6	Comparación de los diferentes modelos no estacionarios.....	160
8.6.1	Comparación del comportamiento de los modelos M3 y M4 en función de las covariables significativas .....	161
8.6.1	Capacidad predictiva de los modelos M1 y M3.....	163
8.6.2	Efectos de la no estacionariedad en los cuantiles de diseño.....	166
8.6.3	Cambios en la probabilidad de ocurrencia .....	168
<b>9</b>	<b>DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....</b>	<b>171</b>
9.1	Estacionariedad de los índices de extremos hidrológicos .....	171
9.1	Influencia del embalse en el régimen de los extremos hidrológicos del río Cauca.....	171
9.2	Índices de embalse.....	172
9.3	Teleconexión entre índices de variabilidad climática y los extremos hidrológicos del río Cauca	173