

SUMARIO

En este trabajo se calculan los tiempos de concentración y se valida la metodología para la determinación de éstos, además, se calculan caudales máximos por las metodologías hidrometeorológicas de Fórmula Racional, Soil Conservation Service, Hidrogramas Unitarios Complejos e Hidrogramas Sintéticos; además se realiza un análisis estadístico de series de caudales máximos y se determina la función de distribución de mejor ajuste. Luego se comparan los resultados de las metodologías hidrometeorológicas con los resultados de las metodologías puntual y regional. Para finalizar, se validan las metodologías hidrometeorológicas antes mencionadas o se determinan los factores de ajuste correspondientes.

ÍNDICE GENERAL

SIGLAS.....	xv
ABREVIATURAS.....	xvi
SIMBOLOGÍA.....	xvii
PRÓLOGO.....	xviii
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Introducción.....	3
1.2 Objetivos.....	4
1.2.1 Objetivo general.....	4
1.2.2 Objetivos específicos.....	4
1.3 Límites y alcances.....	5
1.4 Antecedentes.....	7
1.5 Limitaciones.....	8
2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS PARA EL CÁLCULO DE CAUDALES MÁXIMOS.....	11
2.1 Introducción.....	13
2.2 Fundamentos teóricos sobre Hidrometeorología.....	13
2.2.1 Cálculo de caudales máximos utilizando el Método de la Fórmula Racional.....	14
2.2.2 Estimación de Hidrogramas Unitarios.....	21
2.2.3 Cálculo de caudales máximos a través de Los Hidrogramas Unitarios (Sintéticos y Complejo).....	30
2.3 Cálculo de caudales máximos utilizando el método Regional de Índice de Creciente.....	32
2.4 Fundamentos teóricos estadísticos para la determinación de caudales máximos y determinación de función de mejor ajuste.....	33
2.4.1 Distribuciones de probabilidad más usadas en hidrología para variables.....	42

2.4.2 Pruebas de bondad de ajuste.....	49
2.4.3 Selección de la función de distribución de mejor ajuste.....	51
3. APLICACIÓN DE METODOLOGÍAS.....	53
3.1 Introducción.....	55
3.2 Aplicación de Metodologías Hidrometeorológicas.....	55
3.2.1 Cálculo de caudales máximos por método de la Fórmula Racional.....	55
3.2.2 Cálculo de caudales máximos por método del Hidrograma Sintético de Snyder.....	75
3.2.3 Cálculo de caudales máximos por método del Hidrograma Sintético Triangular, SCS e Hidrograma Unitario Complejo.....	77
3.3 Aplicación de Metodologías Estadísticas.....	93
3.3.1 Aplicación de metodología estadística Regional.....	93
3.3.2 Aplicación de metodología estadística Puntual.....	94
3.4 Selección de distribución de mejor ajuste.....	106
3.4.1 Prueba χ^2 -Cuadrado.....	106
3.4.2 Prueba Smirnov-Kolmogorov.....	108
3.4.3 Cálculo de caudales máximos por metodología estadística puntual de mejor ajuste (Log-Normal).....	109
4. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	111
4.1 Introducción.....	113
4.2 Análisis de resultados de Coeficientes de Escurrimiento C.....	113
4.3 Análisis de resultados de Tiempos de Concentración.....	114
4.3.1 Validación de fórmulas empíricas para calcular tiempos de concentración.....	114
4.4 Análisis de resultados del Número de Curva CN.....	117
4.5 Análisis de resultados de caudales máximos obtenidos mediante el Método Racional.....	118
4.6 Análisis de resultados obtenidos a través de los Hidrogramas	

Sintéticos de Snyder.....	118
4.7 Análisis de resultados obtenidos a través de los Hidrogramas Sintéticos Triangular, SCS e Hidrogramas Unitarios Complejos.....	119
4.8 Análisis de resultados obtenidos mediante el Método Regional de Índice de Creciente.....	122
4.9 Análisis de resultados obtenidos con metodologías estadísticas Puntuales.....	122
4.10 Comparación entre caudales máximos calculados por metodologías hidrometeorológicas y los calculados por metodologías estadísticas (puntual de mejor ajuste y regional).....	124
4.10.1 Comparación entre metodologías para la determinación de caudales máximos por la Fórmula Racional y Estadísticas Puntual y Regional.....	126
4.10.2 Comparación entre metodologías para la determinación de caudales máximos a través del HS de Snyder y Estadísticas Puntual y Regional.....	129
4.10.3 Comparación entre metodologías para la determinación de caudales máximos a través del HS Triangular, SCS y Estadísticas Puntual y Regional.....	131
4.10.4 Comparación entre metodologías para la determinación de caudales máximos a través del HU Complejo y Estadísticas Puntual y Regional.....	136
4.10.5 Comparación entre metodologías para la determinación de caudales máximos por metodologías Estadísticas Puntual y Regional.....	138
4.11 Determinación de factores de ajuste para los Métodos Racional, Hidrogramas Sintéticos de Snyder, Triangular, y Método del Soil Conservation Service e Hidrogramas Unitarios Complejos.....	139
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	143
5.1 Conclusiones.....	145

5.2 Recomendaciones.....	147
GLOSARIO.....	149
BIBLIOGRAFÍA.....	153
ANEXO A. Mapas.....	A-1
ANEXO B. Tablas de valores de las funciones de distribución de probabilidad normal y ji-cuadrado.....	B-1
ANEXO C. Tablas de Coeficientes de Escurrimiento C y Número de Curva CN.	C-1

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Velocidades de recorrido de tanteo en función de la pendiente media de la cuenca.....	20
Tabla 2.2 Promedio de velocidades de escurrimiento para calcular el tiempo de Concentración.....	20
Tabla 2.3 Velocidades promedio aproximadas de esorrentía para calcular el tiempo de concentración.....	21
Tabla 2.4 Ecuaciones de relación entre el valor medio de los caudales máximos $Q_{2.33}$ y el área de la cuenca.....	33
Tabla 2.5 Factores de ajuste para el cálculo de caudales máximos.....	33
Tabla 2.6 Valores críticos d_{crit} para la prueba Smirnov-Kolmogorov de bondad de ajuste.....	50
Tabla 3.1 Cálculo de valor de C ponderado para período de retorno de 5 años....	57
Tabla 3.2 Cálculo de valor de C ponderado para período de retorno de 10 años...	57
Tabla 3.3 Cálculo de valor de C ponderado para período de retorno de 20 años...	57
Tabla 3.4 Cálculo de valor de C ponderado para período de retorno de 25 años..	58
Tabla 3.5 Cálculo de valor de C ponderado para período de retorno de 50 años..	58
Tabla 3.6 Cálculo de valor de C ponderado para período de retorno de 100 años	58
Tabla 3.7 Valores de C finales ponderados para períodos de retorno de 5, 10, 20, 25, 50 y 100 años.....	59
Tabla 3.8 Intensidades para diferentes períodos de retorno para la estación Güija	60
Tabla 3.9 Cálculo de Tiempos de Concentración con fórmulas empíricas de Kirpich, Giandotti y SCS.....	69
Tabla 3.10 Cálculo de Tiempos de Concentración con fórmula empírica de la FAA.....	70
Tabla 3.11 Cálculo de Velocidades Medias para cada estación en estudio por medio de la fórmula de velocidad de esorrentía.....	71
Tabla 3.12 Cálculo de velocidades medias para validación de tiempos de Concentración.....	72
Tabla 3.13 Valores de Intensidades Máximas utilizadas en el Método Racional....	74

Tabla 3.14 Cálculo de Caudales Máximos por metodología de la Fórmula Racional.....	75
Tabla 3.15 Variables necesarias para la construcción del HS de Snyder.....	76
Tabla 3.16 Variables necesarias para la obtención de Caudales Máximos a través del HS de Snyder.....	77
Tabla 3.17 Valores de Caudales Máximos calculados a través del HS de Snyder....	77
Tabla 3.18 Tabla de clasificación de los tipos de suelo en El Salvador según los grupos de suelo del SCS.....	78
Tabla 3.19 Clasificación de áreas de cobertura vegetal y urbana en los tipos de suelo reconocidos en El Salvador para la estación Conacaste Herrado..	79
Tabla 3.20 Clasificación de áreas y valores de CN para cada grupo hidrológico Cálculo de CN ponderado para la cuenca de la estación Conacaste Herrado.....	80
Tabla 3.21 Valores de CN ponderados finales para las estaciones de estudio.....	81
Tabla 3.22 Profundidad de lluvia de diseño obtenida por bloque alterno para un período de Retorno de 5 años (estación San Lorenzo).....	82
Tabla 3.23 Lluvias totales por período de retorno para la estación San Lorenzo.....	82
Tabla 3.24 Lluvias netas por período de retorno para la estación San Lorenzo.....	82
Tabla 3.25 Variables para la construcción del HS Triangular para todas las Estaciones.....	83
Tabla 3.26 Variables para la construcción del HS Triangular, estación San Lorenzo.....	84
Tabla 3.27 Secuencia de acumulación de caudales para la construcción del hidrograma de caudales de la estación San Lorenzo para un período de retorno de 5 años.....	85
Tabla 3.28 Cálculo de caudales máximos a través del HS Triangular para todas las estaciones.....	86
Tabla 3.29 Variables para la construcción del hidrograma sintético SCS, todas las estaciones.....	86
Tabla 3.30 Variables para la construcción del HS SCS, estación San Lorenzo.....	87
Tabla 3.31 Secuencia de acumulación de caudales para la construcción del	

hidrograma de caudales de la estación San Lorenzo para un período de retorno de 5 años (SCS).....	88
Tabla 3.32 Cálculo de caudales máximos a través del HS SCS para todas las Estaciones.....	89
Tabla 3.33 Hietograma de exceso de lluvia e hidrograma de escorrentía directa, estación San Luis Talpa.....	91
Tabla 3.34 Hidrograma Unitario Complejo para la estación San Luis Talpa.....	91
Tabla 3.35 Secuencia de acumulación de caudales para la construcción del hidrograma de caudales de la estación San Lorenzo para un período de retorno de 5 años (HU C).....	92
Tabla 3.36 Cálculo de caudales máximos a través del Hidrograma Unitario Complejo para todas las estaciones.....	92
Tabla 3.37 Factores de ajuste para el cálculo de caudales máximos por metodología Estadística Regional.....	93
Tabla 3.38 Cálculo de caudales a través de la metodología Estadística Regional....	94
Tabla 3.39 Cálculo de distribución de probabilidades Log-Normal para la estación Pasaquina.....	96
Tabla 3.40 Distribuciones de probabilidad Log-Normal para las estaciones analizadas.....	97
Tabla 3.41 Cálculo de distribución de probabilidades Log-Pearson III para la estación Pasaquina.....	98
Tabla 3.42 Distribuciones de probabilidad Log-Perason III para las estaciones Analizadas.....	99
Tabla 3.43 Cálculo de distribución de probabilidades Gumbel para la estación Pasaquina.....	100
Tabla 3.44 Distribuciones de probabilidad Gumbel para las estaciones analizadas..	101
Tabla 3.45 Aplicación de prueba ji-Cuadrado a estación Pasaquina.....	103
Tabla 3.46 Valores calculados del estadístico D para las funciones de distribución en las estaciones analizadas.....	104
Tabla 3.47 Aplicación de prueba Smirnov-Kolmogorov a estación Pasaquina.....	105
Tabla 3.48 Valores calculados del parámetro $D_{máx}$ para las funciones de	

distribución en las estaciones analizadas.....	105
Tabla 3.49 Calificación de funciones para la estación Pasaquina según ji-Cuadrado.....	107
Tabla 3.50 Calificación de funciones para las estaciones analizadas según ji-Cuadrado.....	107
Tabla 3.51 Calificación de funciones para la estación Pasaquina según Smirnov-Kolmogorov.....	108
Tabla 3.52 Calificación de funciones para las estaciones analizadas según Smirnov- Kolmogorov.....	109
Tabla 3.53 Valores de caudales máximos calculados por metodología estadística Log-Normal.....	110
Tabla 4.1 Tabla de estaciones en las abscisas de la gráfica anterior.....	117
Tabla 4.2 Comparación de variables del método de Snyder para el cálculo de caudales máximos.....	119
Tabla 4.3 Tabla comparativa de tiempos bases entre los HU Triangulares y los HU SCS.....	120
Tabla 4.4 Comparación entre Caudales Máximos por metodologías del HU Complejo, HS Triangular y SCS.....	121
Tabla 4.5 Comparación de estaciones de diferente región Hidrológica.....	122
Tabla 4.6 Comparación de caudales máximos entre metodologías Hidrometeorológicas y Estadísticas para la estación Los Tihuilotes.....	124
Tabla 4.7 Porcentajes de diferencia entre métodos Estadístico Puntual y Racional.....	126
Tabla 4.8 Porcentajes de diferencia entre métodos Estadístico Regional y Racional.....	127
Tabla 4.9 Porcentajes de diferencia entre métodos Estadístico Puntual y HS de Snyder.....	129
Tabla 4.10 Porcentajes de diferencia entre métodos Estadístico Regional y HS de Snyder.....	130
Tabla 4.11 Porcentajes de diferencia entre métodos Estadístico Puntual y HS Triangular.....	132

Tabla 4.12 Porcentajes de diferencia entre métodos Estadístico Regional y HS Triangular.....	132
Tabla 4.13 Porcentajes de diferencia entre métodos Estadístico Puntual y HS SCS...	134
Tabla 4.14 Porcentajes de diferencia entre métodos Estadístico Regional y HS SCS.....	134
Tabla 4.15 Porcentajes de diferencia entre métodos Estadístico Puntual y HU Complejo.....	137
Tabla 4.16 Porcentajes de diferencia entre métodos Estadístico Regional y HU Complejo.....	138
Tabla 4.17 Porcentajes de diferencia entre métodos Estadístico Puntual y Regional.....	138
Tabla 4.18 División de estaciones por zona geográfica del país.....	140
Tabla 4.19 Factores de ajuste para diferentes períodos de retorno, Zona Occidental.....	140
Tabla 4.20 Factores de ajuste para diferentes períodos de retorno, Zona Central.....	140
Tabla 4.21 Factores de ajuste para diferentes períodos de retorno, Zona Oriental.....	140
Tabla C-1 Tabla de valores de coeficiente de escurrimiento C.....	C-1
Tabla C-2 Tabla de valores de Números de Curva CN.....	C-2

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Hidrograma Sintético de Snyder.....	23
Figura 2.2 Hidrogramas Sintéticos Triangular y SCS.....	27
Figura 2.3 Distribución de la función de probabilidad de la variable x	37
Figura 2.4 Función de Densidad Log – Normal.....	46
Figura 3.1 Curvas I-D-F, escala aritmética estación Güija.....	61
Figura 3.2 Curvas I-D-F, escala logarítmica estación Güija.....	61
Figura 3.3 Curvas I-D-F, escala aritmética estación Izalco.....	62
Figura 3.4 Curvas I-D-F, escala logarítmica estación Izalco.....	62
Figura 3.5 Curvas I-D-F, escala aritmética estación Galera.....	63
Figura 3.6 Curvas I-D-F, escala logarítmica estación Galera.....	63
Figura 3.7 Curvas I-D-F, escala aritmética estación El Papalón.....	64
Figura 3.8 Curvas I-D-F, escala logarítmica estación El Papalón.....	64
Figura 3.9 Curvas I-D-F, escala aritmética estación Santa Cruz Porrillo.....	65
Figura 3.10 Curvas I-D-F, escala logarítmica estación Santa Cruz Porrillo.....	65
Figura 3.11 Curvas I-D-F, escala aritmética estación Aeropuerto de Ilopango.....	66
Figura 3.12 Curvas I-D-F, escala logarítmica estación Aeropuerto de Ilopango...	66
Figura 3.13 Hidrograma de crecidas para la estación San Luis Talpa.....	90
Figura 3.14 Ubicación de la línea divisoria del caudal base.....	90
Figura 3.15 Gráfico del Hidrograma Unitario Complejo estación San Luis Talpa.	91
Figura 4.1 Gráfico comparativo de velocidades de escurrimiento.....	116
Figura 4.2 Comparación entre Hidrogramas Unitarios Triangular y SCS.....	120
Figura 4.3 Comparación de caudales máximos por HU Complejo, HU Triangular y HU SCS.....	121
Figura 4.4 Gráfico comparativo de caudales máximos entre metodologías Hidrometeorológicas y Estadísticas para la estación Los Tihuilotes...	125
Figura 4.5 Porcentaje de diferencia de caudales máximos entre metodología Estadística Puntual y Racional. T=20 años.....	128
Figura 4.6 Porcentajes de diferencias de caudales máximos entre metodología Estadística Regional y Racional. T=20 años.....	128

Figura 4.7. Porcentajes de diferencias de caudales máximos entre metodología Estadística Puntual y HS de Snyder. T=10 años.....	130
Figura 4.8. Porcentajes de diferencias de caudales máximos entre metodología Estadística Regional e HS de Snyder. T=10 años.....	131
Figura 4.9. Porcentajes de diferencias de caudales máximos entre metodología Estadística Puntual y HS Triangular. T=100 años.....	133
Figura 4.10. Porcentajes de diferencias de caudales máximos entre metodología Estadística Regional y HS Triangular. T=100 años.....	133
Figura 4.11. Porcentajes de diferencias de caudales máximos entre metodología Estadística Puntual y HS SCS. T=100 años.....	135
Figura 4.12. Porcentajes de diferencias de caudales máximos entre metodología Estadística Regional y HS SCS. T=100 años.....	135
Figura 4.13. Porcentajes de diferencias de caudales máximos entre metodología Estadística Puntual y HU Complejo. T=25 años.....	136
Figura 4.14. Porcentajes de diferencias de caudales máximos entre metodología Estadística Regional y HU Complejo. T=25 años.....	137
Figura 4.15. Porcentajes de diferencia entre métodos Estadístico Puntual y Regional T=20 años.....	139
Figura A-1 Mapa de Regiones Hidrográficas.....	A-1
Figura A-2 Simbología.....	A-2
Figura A-3 Regiones hodrológicamente homogéneas.....	A-3
Figura B-1 Valores de la función de distribución de probabilidad normal.....	B-1
Figura B-2 Valores de la función de distribución de probabilidad ji-cuadrado....	B-2

SIGLAS

CALTRANS:	California Department of Transportation.
CES:	Conservation Engineering Service.
CNR:	Centro Nacional de Registros.
CV:	Capital Variable.
EEUU:	Estados Unidos de América.
ES:	El Salvador.
FAA:	Federal Aviation Administration.
HU:	Hidrograma Unitario.
HS:	Hidrograma Sintético.
IGN:	Instituto Geográfico Nacional.
MARN:	Ministerio del Medio Ambiente y Recursos Naturales.
NRCS:	National Resource Conservation Service.
SA:	Sociedad Anónima.
SCS:	Soil Conservation Service.
SHN:	Servicio Hidrológico Nacional.
SNET:	Servicio Nacional de Estudios Territoriales.
TR:	Technical Release.
US:	United States.
USA:	United State of America.
USDA:	United States Department of Agriculture.
USI:	Unidad de Sistemas de Información.
USGS:	United States Geological Service.

ABREVIATURAS

Ec: Ecuación.

Inc: Incorporated.

Ltd: Limited.

Log: Logarítmica.

min: Minutos.

p: Página.

Prob: Probabilidad.

seg: Segundos.

SIMBOLOGÍA

- C: Coeficiente de escurrimiento.
CN: Número de curva.
C?: Coeficiente de variación.
 p : Láminas de precipitación total.
P: Probabilidad.
?: Varianza a partir de la muestra.
S: Retención potencial máxima.
T: Período de retorno.
 \bar{x} : Media a partir de la muestra.
 γ : Coeficiente de asimetría.
 μ : Media aritmética.
 σ : Desviación estándar.
 σ^2 : Varianza.

PRÓLOGO

El capítulo uno, trata sobre las generalidades del documento, introducción, objetivo general y específicos, límites y alcances, antecedentes y limitaciones.

El capítulo dos, trata sobre la descripción de las metodologías hidrometeorológicas y estadísticas utilizadas para la determinación de los caudales máximos. Además se detallan los procedimientos utilizados para la determinación de los factores de ajuste.

En el capítulo tres, se realizan todos los cálculos necesarios para la determinación de los caudales máximos, además, se realizan los cálculos para el análisis estadístico de series de caudales máximos y para la determinación de la función de distribución de mejor ajuste. También se determinan los caudales máximos por metodología estadística regional.

En el capítulo cuatro, se realiza el análisis de resultados de cada una de las metodologías utilizadas para la determinación de caudales máximos, comparando las hidrometeorológicas con la regional y la estadística de mejor ajuste. Además, de ser necesario, se determinan los factores de ajuste para las metodologías hidrometeorológicas que lo requieran.

Para finalizar, en el capítulo cinco se presentan las conclusiones y recomendaciones pertinentes.