

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CENTRO DEL PERÚ

ESCUELA DE POSGRADO

UNIDAD DE POSGRADO DE LA FACULTAD DE
CIENCIAS FORESTALES Y DEL AMBIENTE



ANEXOS
(INFORMACIÓN SUPLEMENTARIA)

Tesis: Predicción de sequías mediante modelos de copulas y
datos hidrometeorológicos en la Región Sur del Perú, 2024

PRESENTADA POR:

Virgilio Arriaga Gomez

PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE:

MAESTRO EN GESTIÓN SOSTENIBLE DE
CUENCAS HIDROGRÁFICAS

Huancayo – Perú
2025

Índice de Anexos

A. Anexo: Parámetros de Ajuste Univariado	2
B. Gráficos de Contorno de Cúpulas Ajustadas	9
C. Gráficos de Periodos de Retorno Conjunto	24
D. Gráficos de Probabilidad Condicional	39
E. Tablas de Predicción de Riesgo de Sequía	54
F. Gráficos de Predicción de Riesgo (Simulación vs. Histórico)	59
G. Distribución Espacial del Riesgo de Sequía	75
H. Mapas de Vulnerabilidad Integral (Física y Social)	79
I. Códigos en Lenguaje Python	83
I.1. Mapas de Validación Cruzada	83
I.2. Procesamiento y Análisis de Datos Climáticos	84
I.2.1. Carga y verificación estructural de la base de datos SENAMHI .	84
I.2.2. Auditoría visual del proceso de imputación MICE	85
I.2.3. Cálculo de la evapotranspiración de referencia (ET ₀)	86
I.2.4. Conversión de la evapotranspiración diaria a escala mensual . .	87

Capítulo A

Anexo: Parámetros de Ajuste Univariado

Tabla A.1: Parámetros de ajuste y bondad de ajuste (AIC, MLLF) para todas las estaciones y variables analizadas.

Estación	Variable	Modelo	Parámetros Estimados	AIC	MLLF
ANANEA	Duración	Gamma	$\alpha=0.548, \gamma=0.521, \beta=15.255$	167.71	-80.85
	Duración	Weibull	$k=0.657, \gamma=0.521, \lambda=14.746$	180.89	-87.45
	Duración	Lognormal	$\sigma=1.983, \gamma=0.500, e^\mu=2.960$	203.70	-98.85
	Duración	Exponential	$\gamma=0.521, \sigma=9.682$	206.75	-101.38
	Duración	GEV	$\xi=-1.567, \mu=1.952, \sigma=2.533$	210.26	-102.13
	Severidad	Gamma	$\alpha=0.320, \gamma=0.004, \beta=8.137$	131.22	-62.61
	Severidad	Weibull	$k=0.461, \gamma=0.004, \lambda=3.517$	123.09	-58.54
	Severidad	Lognormal	$\sigma=7.810, \gamma=0.004, e^\mu=0.365$	158.93	-76.46
	Severidad	Exponential	$\gamma=0.004, \sigma=8.186$	196.35	-96.17
	Severidad	GEV	$\xi=-2.563, \mu=0.321, \sigma=0.827$	171.59	-82.80
ANDAHUAYLAS	Duración	Gamma	$\alpha=0.368, \gamma=0.565, \beta=45.359$	114.22	-54.11
	Duración	Weibull	$k=0.498, \gamma=0.565, \lambda=23.244$	127.10	-60.55
	Duración	Lognormal	$\sigma=7.943, \gamma=0.565, e^\mu=0.699$	150.10	-72.05
	Duración	Exponential	$\gamma=0.565, \sigma=13.288$	168.99	-82.50
	Duración	GEV	$\xi=-1.509, \mu=1.984, \sigma=2.412$	155.85	-74.92
	Severidad	Gamma	$\alpha=0.229, \gamma=0.016, \beta=93.046$	64.59	-29.30
	Severidad	Weibull	$k=0.380, \gamma=0.016, \lambda=29.474$	81.78	-37.89
	Severidad	Lognormal	$\sigma=8.526, \gamma=0.016, e^\mu=0.194$	94.48	-44.24
	Severidad	Exponential	$\gamma=0.016, \sigma=11.022$	160.40	-78.20
	Severidad	GEV	$\xi=-2.102, \mu=0.309, \sigma=0.642$	110.30	-52.15
ANTA ANCA-CHURO	Duración	Gamma	$\alpha=0.459, \gamma=0.506, \beta=16.153$	122.61	-58.31
	Duración	Weibull	$k=0.642, \gamma=0.506, \lambda=12.684$	129.08	-61.54
	Duración	Lognormal	$\sigma=8.593, \gamma=0.506, e^\mu=1.061$	151.18	-72.59
	Duración	Exponential	$\gamma=0.506, \sigma=15.327$	153.18	-74.59
	Duración	GEV	$\xi=-0.504, \mu=6.724, \sigma=7.690$	161.69	-77.84
	Severidad	Gamma	$\alpha=0.609, \gamma=0.008, \beta=42.592$	112.08	-53.04
	Severidad	Weibull	$k=0.514, \gamma=0.008, \lambda=15.328$	100.49	-47.25
	Severidad	Lognormal	$\sigma=9.396, \gamma=0.008, e^\mu=0.446$	120.05	-57.02
	Severidad	Exponential	$\gamma=0.008, \sigma=12.686$	145.62	-70.81

Continúa en la siguiente página...

Tabla A.1 – continuación de la página anterior

Estación	Variable	Modelo	Parámetros Estimados	AIC	MLLF
AYMARAES	Severidad	GEV	$\xi=-1.811, \mu=1.297, \sigma=2.561$	142.24	-68.12
	Duración	Gamma	$\alpha=0.613, \gamma=0.564, \beta=16.351$	141.03	-67.51
	Duración	Weibull	$k=0.745, \gamma=0.564, \lambda=12.082$	148.93	-71.46
	Duración	Lognormal	$\sigma=1.648, \gamma=0.462, e^\mu=5.071$	168.93	-81.47
	Duración	Exponential	$\gamma=0.564, \sigma=13.282$	168.97	-82.49
	Duración	GEV	$\xi=-1.279, \mu=3.163, \sigma=3.961$	172.36	-83.18
	Severidad	Gamma	$\alpha=0.292, \gamma=0.035, \beta=19.184$	82.43	-38.21
	Severidad	Weibull	$k=0.591, \gamma=0.035, \lambda=13.020$	106.73	-50.36
	Severidad	Lognormal	$\sigma=8.542, \gamma=0.035, e^\mu=0.281$	111.53	-52.77
	Severidad	Exponential	$\gamma=0.035, \sigma=11.003$	160.31	-78.16
	Severidad	GEV	$\xi=-2.729, \mu=0.337, \sigma=0.835$	133.35	-63.68
CANDARAVE	Duración	Gamma	$\alpha=0.835, \gamma=0.531, \beta=17.804$	138.08	-66.04
	Duración	Weibull	$k=0.389, \gamma=0.531, \lambda=28.267$	124.15	-59.08
	Duración	Lognormal	$\sigma=1.027, \gamma=-0.805, e^\mu=11.143$	152.55	-73.28
	Duración	Exponential	$\gamma=0.531, \sigma=16.146$	147.70	-71.85
	Duración	GEV	$\xi=-0.466, \mu=7.714, \sigma=7.909$	154.20	-74.10
	Severidad	Gamma	$\alpha=0.459, \gamma=0.102, \beta=19.617$	99.50	-46.75
	Severidad	Weibull	$k=0.701, \gamma=0.102, \lambda=8.677$	116.13	-55.07
	Severidad	Lognormal	$\sigma=9.200, \gamma=0.102, e^\mu=0.643$	127.44	-60.72
	Severidad	Exponential	$\gamma=0.102, \sigma=13.259$	140.22	-68.11
	Severidad	GEV	$\xi=-1.651, \mu=2.078, \sigma=3.632$	145.83	-69.92
CARAVELI	Duración	Gamma	$\alpha=0.492, \gamma=0.728, \beta=29.558$	81.05	-37.53
	Duración	Weibull	$k=0.587, \gamma=0.728, \lambda=17.111$	85.30	-39.65
	Duración	Lognormal	$\sigma=10.128, \gamma=0.728, e^\mu=0.509$	91.62	-42.81
	Duración	Exponential	$\gamma=0.728, \sigma=22.015$	118.57	-57.28
	Duración	GEV	$\xi=-1.400, \mu=3.870, \sigma=5.248$	117.18	-55.59
	Severidad	Gamma	$\alpha=0.452, \gamma=0.020, \beta=55.073$	52.92	-23.46
	Severidad	Weibull	$k=0.407, \gamma=0.020, \lambda=33.789$	50.78	-22.39
	Severidad	Lognormal	$\sigma=10.840, \gamma=0.020, e^\mu=0.126$	54.42	-24.21
	Severidad	Exponential	$\gamma=0.020, \sigma=18.114$	113.11	-54.55
	Severidad	GEV	$\xi=-2.723, \mu=0.403, \sigma=1.064$	89.85	-41.92
CAYLLOMA	Duración	Gamma	$\alpha=0.657, \gamma=0.551, \beta=22.802$	128.47	-61.23
	Duración	Weibull	$k=0.697, \gamma=0.551, \lambda=24.731$	135.52	-64.76
	Duración	Lognormal	$\sigma=8.567, \gamma=0.551, e^\mu=1.063$	151.12	-72.56
	Duración	Exponential	$\gamma=0.551, \sigma=15.283$	153.07	-74.54
	Duración	GEV	$\xi=-0.965, \mu=4.709, \sigma=5.751$	159.18	-76.59
	Severidad	Gamma	$\alpha=0.559, \gamma=0.035, \beta=19.048$	102.71	-48.35
	Severidad	Weibull	$k=0.525, \gamma=0.035, \lambda=16.374$	101.71	-47.85
	Severidad	Lognormal	$\sigma=9.106, \gamma=0.035, e^\mu=0.444$	118.66	-56.33
	Severidad	Exponential	$\gamma=0.035, \sigma=12.658$	145.53	-70.77
	Severidad	GEV	$\xi=-2.044, \mu=1.024, \sigma=2.136$	140.16	-67.08
CORA CORA	Duración	Gamma	$\alpha=0.562, \gamma=0.726, \beta=22.240$	138.77	-66.38
	Duración	Weibull	$k=0.555, \gamma=0.726, \lambda=14.496$	140.24	-67.12
	Duración	Lognormal	$\sigma=7.669, \gamma=0.726, e^\mu=0.824$	169.14	-81.57
	Duración	Exponential	$\gamma=0.726, \sigma=11.962$	178.09	-87.04

Continúa en la siguiente página...

Tabla A.1 – continuación de la página anterior

Estación	Variable	Modelo	Parámetros Estimados	AIC	MLLF
COTAHUASI	Duración	GEV	$\xi=-1.649, \mu=2.162, \sigma=2.618$	174.47	-84.23
	Severidad	Gamma	$\alpha=0.749, \gamma=0.008, \beta=38.814$	149.49	-71.75
	Severidad	Weibull	$k=0.415, \gamma=0.008, \lambda=15.794$	95.15	-44.57
	Severidad	Lognormal	$\sigma=8.440, \gamma=0.008, e^\mu=0.260$	116.29	-55.15
	Severidad	Exponential	$\gamma=0.008, \sigma=10.147$	169.86	-82.93
	Severidad	GEV	$\xi=-2.533, \mu=0.318, \sigma=0.803$	136.44	-65.22
CURPAHUASI	Duración	Gamma	$\alpha=0.588, \gamma=0.742, \beta=11.919$	129.74	-61.87
	Duración	Weibull	$k=0.537, \gamma=0.742, \lambda=13.150$	118.79	-56.40
	Duración	Lognormal	$\sigma=8.398, \gamma=0.742, e^\mu=0.716$	140.91	-67.46
	Duración	Exponential	$\gamma=0.742, \sigma=14.418$	158.08	-77.04
	Duración	GEV	$\xi=-1.751, \mu=2.454, \sigma=3.343$	159.43	-76.71
	Severidad	Gamma	$\alpha=0.528, \gamma=0.004, \beta=11.463$	103.70	-48.85
	Severidad	Weibull	$k=0.456, \gamma=0.004, \lambda=17.482$	93.63	-43.82
	Severidad	Lognormal	$\sigma=9.310, \gamma=0.004, e^\mu=0.322$	111.70	-52.85
	Severidad	Exponential	$\gamma=0.004, \sigma=12.085$	150.66	-73.33
	Severidad	GEV	$\xi=-2.190, \mu=0.603, \sigma=1.361$	133.69	-63.84
GRANJA KAYRA	Duración	Gamma	$\alpha=0.488, \gamma=0.505, \beta=22.431$	130.49	-62.24
	Duración	Weibull	$k=0.571, \gamma=0.505, \lambda=16.623$	140.71	-67.35
	Duración	Lognormal	$\sigma=7.776, \gamma=0.505, e^\mu=0.718$	162.96	-78.48
	Duración	Exponential	$\gamma=0.505, \sigma=12.232$	179.20	-87.60
	Duración	GEV	$\xi=-2.142, \mu=1.553, \sigma=2.367$	179.55	-86.78
	Severidad	Gamma	$\alpha=0.613, \gamma=0.008, \beta=36.435$	124.00	-59.00
	Severidad	Weibull	$k=0.433, \gamma=0.008, \lambda=15.406$	99.23	-46.62
	Severidad	Lognormal	$\sigma=8.494, \gamma=0.008, e^\mu=0.274$	119.13	-56.56
	Severidad	Exponential	$\gamma=0.008, \sigma=10.147$	169.86	-82.93
	Severidad	GEV	$\xi=-2.814, \mu=0.272, \sigma=0.751$	140.71	-67.36
GRANJA SAN ANTONIO	Duración	Gamma	$\alpha=0.571, \gamma=0.677, \beta=9.955$	176.61	-85.30
	Duración	Weibull	$k=0.646, \gamma=0.677, \lambda=8.220$	177.06	-85.53
	Duración	Lognormal	$\sigma=2.026, \gamma=0.663, e^\mu=2.651$	204.39	-99.20
	Duración	Exponential	$\gamma=0.677, \sigma=9.314$	210.82	-103.41
	Duración	GEV	$\xi=-1.711, \mu=1.822, \sigma=2.120$	210.54	-102.27
	Severidad	Gamma	$\alpha=0.383, \gamma=0.012, \beta=7.383$	133.08	-63.54
	Severidad	Weibull	$k=0.435, \gamma=0.012, \lambda=3.985$	118.88	-56.44
	Severidad	Lognormal	$\sigma=7.608, \gamma=0.012, e^\mu=0.324$	154.64	-74.32
	Severidad	Exponential	$\gamma=0.012, \sigma=7.922$	200.46	-98.23
	Severidad	GEV	$\xi=-2.716, \mu=0.251, \sigma=0.657$	167.74	-80.87
GRANJA SAN ANTONIO	Duración	Gamma	$\alpha=0.652, \gamma=0.669, \beta=16.901$	162.49	-78.25
	Duración	Weibull	$k=0.688, \gamma=0.669, \lambda=14.039$	167.13	-80.57
	Duración	Lognormal	$\sigma=1.694, \gamma=0.598, e^\mu=4.353$	190.50	-92.25
	Duración	Exponential	$\gamma=0.669, \sigma=11.224$	188.58	-92.29
	Duración	GEV	$\xi=-1.388, \mu=2.812, \sigma=3.434$	195.58	-94.79
	Severidad	Gamma	$\alpha=0.550, \gamma=0.016, \beta=35.507$	132.24	-63.12
	Severidad	Weibull	$k=0.534, \gamma=0.016, \lambda=13.085$	126.37	-60.19

Continúa en la siguiente página...

Tabla A.1 – continuación de la página anterior

Estación	Variable	Modelo	Parámetros Estimados	AIC	MLLF
HUAMBO	Severidad	Lognormal	$\sigma=7.999, \gamma=0.016, e^\mu=0.441$	150.65	-72.33
	Severidad	Exponential	$\gamma=0.016, \sigma=9.387$	178.92	-87.46
	Severidad	GEV	$\xi=-2.029, \mu=0.603, \sigma=1.246$	159.71	-76.86
HUARAYA MOHO	Duración	Gamma	$\alpha=0.554, \gamma=0.537, \beta=10.671$	146.88	-70.44
	Duración	Weibull	$k=0.458, \gamma=0.537, \lambda=13.830$	135.67	-64.84
	Duración	Lognormal	$\sigma=7.696, \gamma=0.537, e^\mu=0.799$	167.73	-80.87
	Duración	Exponential	$\gamma=0.537, \sigma=12.094$	178.63	-87.32
	Duración	GEV	$\xi=-1.839, \mu=1.758, \sigma=2.407$	175.61	-84.80
	Severidad	Gamma	$\alpha=0.366, \gamma=0.028, \beta=13.010$	97.03	-45.51
	Severidad	Weibull	$k=0.337, \gamma=0.028, \lambda=26.338$	100.62	-47.31
	Severidad	Lognormal	$\sigma=8.335, \gamma=0.028, e^\mu=0.290$	121.05	-57.53
	Severidad	Exponential	$\gamma=0.028, \sigma=10.127$	169.76	-82.88
	Severidad	GEV	$\xi=-2.480, \mu=0.345, \sigma=0.803$	138.83	-66.42
IMATA	Duración	Gamma	$\alpha=0.832, \gamma=0.514, \beta=5.955$	218.37	-106.19
	Duración	Weibull	$k=0.791, \gamma=0.514, \lambda=8.409$	203.89	-98.95
	Duración	Lognormal	$\sigma=1.674, \gamma=0.441, e^\mu=3.682$	226.15	-110.07
	Duración	Exponential	$\gamma=0.514, \sigma=8.809$	219.95	-107.98
	Duración	GEV	$\xi=-1.227, \mu=2.556, \sigma=3.141$	233.07	-113.54
	Severidad	Gamma	$\alpha=0.449, \gamma=0.008, \beta=11.105$	149.63	-71.81
	Severidad	Weibull	$k=0.557, \gamma=0.008, \lambda=14.476$	166.10	-80.05
	Severidad	Lognormal	$\sigma=2.304, \gamma=0.005, e^\mu=1.589$	190.75	-92.37
	Severidad	Exponential	$\gamma=0.008, \sigma=7.459$	208.64	-102.32
	Severidad	GEV	$\xi=-1.989, \mu=0.597, \sigma=1.223$	196.69	-95.34
LA YARADA	Duración	Gamma	$\alpha=0.621, \gamma=0.598, \beta=16.599$	149.05	-71.52
	Duración	Weibull	$k=0.626, \gamma=0.598, \lambda=12.050$	151.06	-72.53
	Duración	Lognormal	$\sigma=1.941, \gamma=0.561, e^\mu=4.183$	181.65	-87.83
	Duración	Exponential	$\gamma=0.598, \sigma=12.079$	178.57	-87.29
	Duración	GEV	$\xi=-1.577, \mu=2.626, \sigma=3.620$	187.81	-90.91
	Severidad	Gamma	$\alpha=0.660, \gamma=0.059, \beta=9.361$	138.40	-66.20
	Severidad	Weibull	$k=0.482, \gamma=0.059, \lambda=5.853$	117.60	-55.80
	Severidad	Lognormal	$\sigma=8.171, \gamma=0.059, e^\mu=0.525$	149.76	-71.88
	Severidad	Exponential	$\gamma=0.059, \sigma=10.096$	169.61	-82.80
	Severidad	GEV	$\xi=-1.883, \mu=0.883, \sigma=1.643$	159.09	-76.55
MACUSANI	Duración	Gamma	$\alpha=0.209, \gamma=0.594, \beta=73.316$	58.26	-26.13
	Duración	Weibull	$k=0.263, \gamma=0.594, \lambda=32.174$	66.09	-30.04
	Duración	Lognormal	$\sigma=10.939, \gamma=0.594, e^\mu=0.499$	80.80	-37.40
	Duración	Exponential	$\gamma=0.594, \sigma=25.801$	106.01	-51.00
	Duración	GEV	$\xi=-0.606, \mu=8.764, \sigma=9.747$	106.76	-50.38
	Severidad	Gamma	$\alpha=0.705, \gamma=0.016, \beta=90.210$	80.05	-37.03
	Severidad	Weibull	$k=0.355, \gamma=0.016, \lambda=77.540$	47.72	-20.86
	Severidad	Lognormal	$\sigma=11.673, \gamma=0.016, e^\mu=0.142$	52.17	-23.09
	Severidad	Exponential	$\gamma=0.016, \sigma=21.140$	101.23	-48.61
	Severidad	GEV	$\xi=-1.643, \mu=1.509, \sigma=2.806$	89.05	-41.53

Continúa en la siguiente página...

Tabla A.1 – continuación de la página anterior

Estación	Variable	Modelo	Parámetros Estimados	AIC	MLLF
MAÑAZO	Duración	Lognormal	$\sigma=1.246, \gamma=0.174, e^\mu=6.118$	206.11	-100.05
	Duración	Exponential	$\gamma=0.603, \sigma=10.453$	198.12	-97.06
	Duración	GEV	$\xi=-0.626, \mu=4.717, \sigma=5.009$	210.13	-102.07
	Severidad	Gamma	$\alpha=0.610, \gamma=0.028, \beta=7.877$	157.25	-75.62
	Severidad	Weibull	$k=0.531, \gamma=0.028, \lambda=14.698$	151.33	-72.67
	Severidad	Lognormal	$\sigma=2.191, \gamma=0.018, e^\mu=2.431$	185.31	-89.66
	Severidad	Exponential	$\gamma=0.028, \sigma=8.727$	187.65	-91.83
	Severidad	GEV	$\xi=-1.748, \mu=1.149, \sigma=2.154$	192.33	-93.16
PAMPA BLANCA	Duración	Gamma	$\alpha=0.573, \gamma=0.558, \beta=15.034$	171.01	-82.51
	Duración	Weibull	$k=0.922, \gamma=0.558, \lambda=11.066$	190.32	-92.16
	Duración	Lognormal	$\sigma=0.901, \gamma=-0.809, e^\mu=8.543$	199.76	-96.88
	Duración	Exponential	$\gamma=0.558, \sigma=10.811$	193.31	-94.65
	Duración	GEV	$\xi=-0.342, \mu=5.976, \sigma=5.624$	201.76	-97.88
	Severidad	Gamma	$\alpha=0.507, \gamma=0.008, \beta=15.243$	136.70	-65.35
	Severidad	Weibull	$k=0.629, \gamma=0.008, \lambda=4.756$	148.57	-71.29
	Severidad	Lognormal	$\sigma=8.049, \gamma=0.008, e^\mu=0.666$	179.53	-86.76
	Severidad	Exponential	$\gamma=0.008, \sigma=9.059$	183.41	-89.71
	Severidad	GEV	$\xi=-1.555, \mu=1.385, \sigma=2.481$	188.80	-91.40
PAUCARAY	Duración	Gamma	$\alpha=0.550, \gamma=4.573, \beta=23.919$	81.96	-37.98
	Duración	Weibull	$k=0.312, \gamma=4.573, \lambda=7.972$	77.20	-35.60
	Duración	Lognormal	$\sigma=9.969, \gamma=4.573, e^\mu=0.740$	94.86	-44.43
	Duración	Exponential	$\gamma=4.573, \sigma=19.861$	107.71	-51.85
	Duración	GEV	$\xi=-0.617, \mu=12.107, \sigma=8.591$	111.80	-52.90
	Severidad	Gamma	$\alpha=0.306, \gamma=0.458, \beta=56.075$	56.42	-25.21
	Severidad	Weibull	$k=0.275, \gamma=0.458, \lambda=9.855$	60.91	-27.45
	Severidad	Lognormal	$\sigma=10.607, \gamma=0.458, e^\mu=0.361$	77.79	-35.89
	Severidad	Exponential	$\gamma=0.458, \sigma=19.071$	106.65	-51.33
	Severidad	GEV	$\xi=-1.259, \mu=3.480, \sigma=4.711$	104.59	-49.30
PIZACOMA	Duración	Gamma	$\alpha=0.404, \gamma=0.556, \beta=37.927$	149.05	-71.52
	Duración	Weibull	$k=0.467, \gamma=0.556, \lambda=17.557$	159.73	-76.87
	Duración	Lognormal	$\sigma=2.318, \gamma=0.552, e^\mu=1.977$	188.35	-91.17
	Duración	Exponential	$\gamma=0.556, \sigma=9.699$	206.86	-101.43
	Duración	GEV	$\xi=-1.704, \mu=1.519, \sigma=1.825$	195.08	-94.54
	Severidad	Gamma	$\alpha=0.476, \gamma=0.008, \beta=41.429$	118.45	-56.23

Continúa en la siguiente página...

Tabla A.1 – continuación de la página anterior

Estación	Variable	Modelo	Parámetros Estimados	AIC	MLLF
PUCARA	Severidad	Weibull	$k=0.547, \gamma=0.004, \lambda=7.799$	137.62	-65.81
	Severidad	Lognormal	$\sigma=7.954, \gamma=0.004, e^\mu=0.458$	168.70	-81.35
	Severidad	Exponential	$\gamma=0.004, \sigma=8.459$	192.11	-94.06
	Severidad	GEV	$\xi=-2.645, \mu=0.419, \sigma=1.114$	183.71	-88.85
PUCARA	Duración	Gamma	$\alpha=0.341, \gamma=0.526, \beta=58.905$	124.40	-59.20
	Duración	Weibull	$k=0.933, \gamma=0.526, \lambda=22.274$	174.77	-84.39
	Duración	Lognormal	$\sigma=7.823, \gamma=0.526, e^\mu=0.856$	165.38	-79.69
	Duración	Exponential	$\gamma=0.526, \sigma=12.817$	174.44	-85.22
	Duración	GEV	$\xi=-1.078, \mu=2.885, \sigma=3.390$	168.25	-81.13
	Severidad	Gamma	$\alpha=0.562, \gamma=0.024, \beta=49.901$	114.87	-54.44
	Severidad	Weibull	$k=0.395, \gamma=0.024, \lambda=31.593$	95.81	-44.90
	Severidad	Lognormal	$\sigma=8.399, \gamma=0.024, e^\mu=0.253$	110.35	-52.17
	Severidad	Exponential	$\gamma=0.024, \sigma=10.554$	165.11	-80.56
	Severidad	GEV	$\xi=-2.170, \mu=0.388, \sigma=0.822$	126.04	-60.02
PUNTA ATI-CO	Duración	Gamma	$\alpha=0.288, \gamma=0.747, \beta=95.181$	95.05	-44.53
PUNTA ATI-CO	Duración	Weibull	$k=0.784, \gamma=0.747, \lambda=23.953$	129.57	-61.79
	Duración	Lognormal	$\sigma=8.713, \gamma=0.747, e^\mu=0.679$	127.46	-60.73
	Duración	Exponential	$\gamma=0.747, \sigma=16.092$	147.58	-71.79
	Duración	GEV	$\xi=-1.402, \mu=2.834, \sigma=3.416$	140.21	-67.11
	Severidad	Gamma	$\alpha=0.601, \gamma=0.020, \beta=59.297$	97.77	-45.89
	Severidad	Weibull	$k=0.234, \gamma=0.020, \lambda=40.516$	65.89	-29.94
	Severidad	Lognormal	$\sigma=9.388, \gamma=0.020, e^\mu=0.192$	82.29	-38.15
	Severidad	Exponential	$\gamma=0.020, \sigma=13.342$	140.46	-68.23
	Severidad	GEV	$\xi=-2.478, \mu=0.362, \sigma=0.868$	108.25	-51.13
	Duración	Gamma	$\alpha=0.691, \gamma=1.020, \beta=22.271$	72.55	-33.27
PUNTA CO-LES	Duración	Weibull	$k=0.465, \gamma=1.020, \lambda=15.294$	52.60	-23.30
PUNTA CO-LES	Duración	Lognormal	$\sigma=11.747, \gamma=1.020, e^\mu=0.217$	53.08	-23.54
	Duración	Exponential	$\gamma=1.020, \sigma=30.810$	92.56	-44.28
	Duración	GEV	$\xi=-4.773, \mu=1.085, \sigma=0.308$	91.02	-42.51
	Severidad	Gamma	$\alpha=0.429, \gamma=0.028, \beta=30.377$	35.64	-14.82
	Severidad	Weibull	$k=0.647, \gamma=0.028, \lambda=40.682$	55.09	-24.54
	Severidad	Lognormal	$\sigma=12.849, \gamma=0.028, e^\mu=0.063$	30.06	-12.03
	Severidad	Exponential	$\gamma=0.028, \sigma=25.360$	88.66	-42.33
	Severidad	GEV	$\xi=-5.462, \mu=0.071, \sigma=0.238$	72.30	-33.15
SANTO TOMAS	Duración	Gamma	$\alpha=0.766, \gamma=0.629, \beta=7.818$	193.91	-93.96
SANTO TOMAS	Duración	Weibull	$k=0.624, \gamma=0.629, \lambda=8.834$	176.45	-85.23
	Duración	Lognormal	$\sigma=1.984, \gamma=0.609, e^\mu=2.784$	206.20	-100.10
	Duración	Exponential	$\gamma=0.629, \sigma=9.260$	210.44	-103.22
	Duración	GEV	$\xi=-1.503, \mu=2.040, \sigma=2.443$	212.78	-103.39
	Severidad	Gamma	$\alpha=0.515, \gamma=0.004, \beta=11.162$	139.88	-66.94
	Severidad	Weibull	$k=0.490, \gamma=0.004, \lambda=7.819$	135.75	-64.88
	Severidad	Lognormal	$\sigma=2.414, \gamma=0.002, e^\mu=1.319$	170.93	-82.46
	Severidad	Exponential	$\gamma=0.004, \sigma=7.930$	200.52	-98.26

Continúa en la siguiente página...

Tabla A.1 – continuación de la página anterior

Estación	Variable	Modelo	Parámetros Estimados	AIC	MLLF
SICUANI	Severidad	GEV	$\xi=-2.011, \mu=0.484, \sigma=1.006$	175.31	-84.65
	Duración	Gamma	$\alpha=0.522, \gamma=0.539, \beta=15.794$	139.45	-66.72
	Duración	Weibull	$k=0.517, \gamma=0.539, \lambda=25.195$	146.85	-70.43
	Duración	Lognormal	$\sigma=7.789, \gamma=0.539, e^\mu=0.871$	172.69	-83.35
	Duración	Exponential	$\gamma=0.539, \sigma=12.058$	178.49	-87.24
	Duración	GEV	$\xi=-1.186, \mu=3.075, \sigma=3.939$	183.98	-88.99
	Severidad	Gamma	$\alpha=0.711, \gamma=0.020, \beta=8.982$	138.09	-66.04
	Severidad	Weibull	$k=0.627, \gamma=0.020, \lambda=3.663$	123.15	-58.57
	Severidad	Lognormal	$\sigma=8.350, \gamma=0.020, e^\mu=0.361$	132.05	-63.02
	Severidad	Exponential	$\gamma=0.020, \sigma=10.135$	169.80	-82.90
	Severidad	GEV	$\xi=-2.590, \mu=0.422, \sigma=1.061$	151.19	-72.60
TAMBOBAMBAD	Duración	Gamma	$\alpha=0.650, \gamma=0.742, \beta=11.100$	147.99	-70.99
	Duración	Weibull	$k=0.580, \gamma=0.742, \lambda=14.150$	139.61	-66.81
	Duración	Lognormal	$\sigma=7.878, \gamma=0.742, e^\mu=0.863$	166.11	-80.06
	Duración	Exponential	$\gamma=0.742, \sigma=12.433$	172.98	-84.49
	Duración	GEV	$\xi=-1.825, \mu=2.281, \sigma=3.061$	178.19	-86.09
	Severidad	Gamma	$\alpha=0.424, \gamma=0.004, \beta=12.843$	102.93	-48.46
	Severidad	Weibull	$k=0.831, \gamma=0.004, \lambda=17.743$	148.69	-71.34
	Severidad	Lognormal	$\sigma=8.825, \gamma=0.004, e^\mu=0.339$	126.67	-60.33
	Severidad	Exponential	$\gamma=0.004, \sigma=10.574$	165.20	-80.60
	Severidad	GEV	$\xi=-2.839, \mu=0.370, \sigma=1.052$	150.69	-72.35
UBINAS	Duración	Gamma	$\alpha=0.548, \gamma=0.620, \beta=15.427$	136.47	-65.23
	Duración	Weibull	$k=0.609, \gamma=0.620, \lambda=17.171$	141.58	-67.79
	Duración	Lognormal	$\sigma=8.028, \gamma=0.620, e^\mu=0.996$	166.92	-80.46
	Duración	Exponential	$\gamma=0.620, \sigma=13.184$	168.64	-82.32
	Duración	GEV	$\xi=-1.626, \mu=2.719, \sigma=3.838$	177.04	-85.52
	Severidad	Gamma	$\alpha=0.731, \gamma=0.004, \beta=6.280$	145.08	-69.54
	Severidad	Weibull	$k=0.416, \gamma=0.004, \lambda=14.664$	97.86	-45.93
	Severidad	Lognormal	$\sigma=8.977, \gamma=0.004, e^\mu=0.327$	120.79	-57.40
	Severidad	Exponential	$\gamma=0.004, \sigma=11.034$	160.45	-78.22
	Severidad	GEV	$\xi=-2.675, \mu=0.409, \sigma=1.100$	144.47	-69.24

Capítulo B

Gráficos de Contorno de Cópulas Ajustadas

En este anexo se presentan los gráficos de contorno de las funciones de densidad de probabilidad conjuntas (PDF) modeladas mediante cópulas para las 28 estaciones meteorológicas. Estos gráficos ilustran la estructura de dependencia entre la duración (eje X) y la severidad (eje Y) de las sequías.

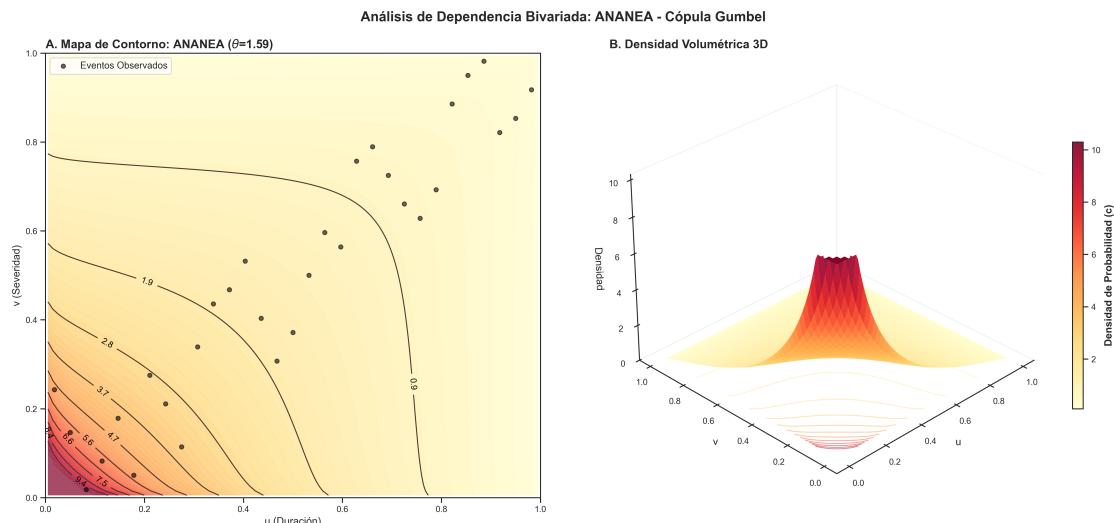


Figura B.1: Isolineas de probabilidad conjunta para la estación Ananea.

Análisis de Dependencia Bivariada: ANDAHUAYLAS - Cúpula Gumbel

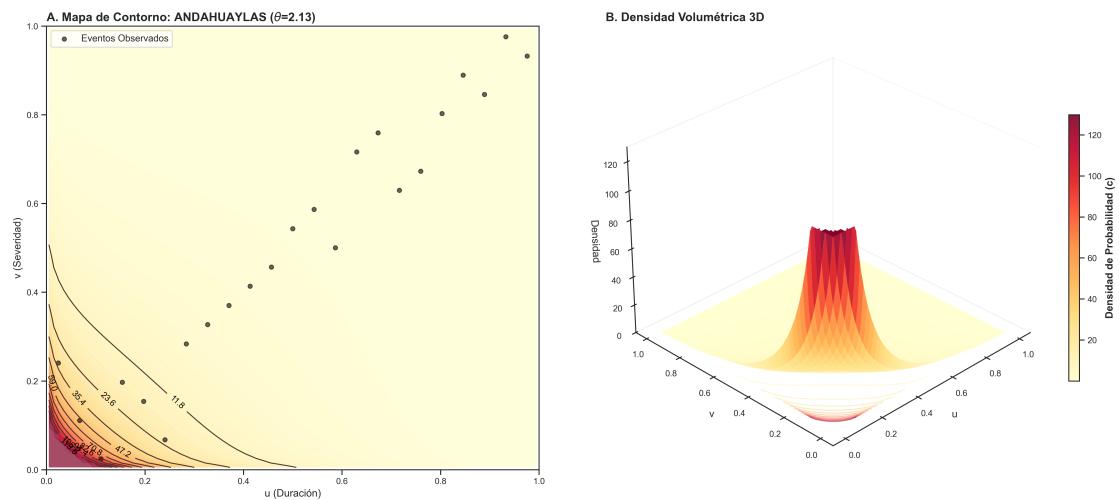


Figura B.2: Isolineas de probabilidad conjunta para la estación Andahuaylas.

Análisis de Dependencia Bivariada: ANTA ANCACHURO - Cúpula Gumbel

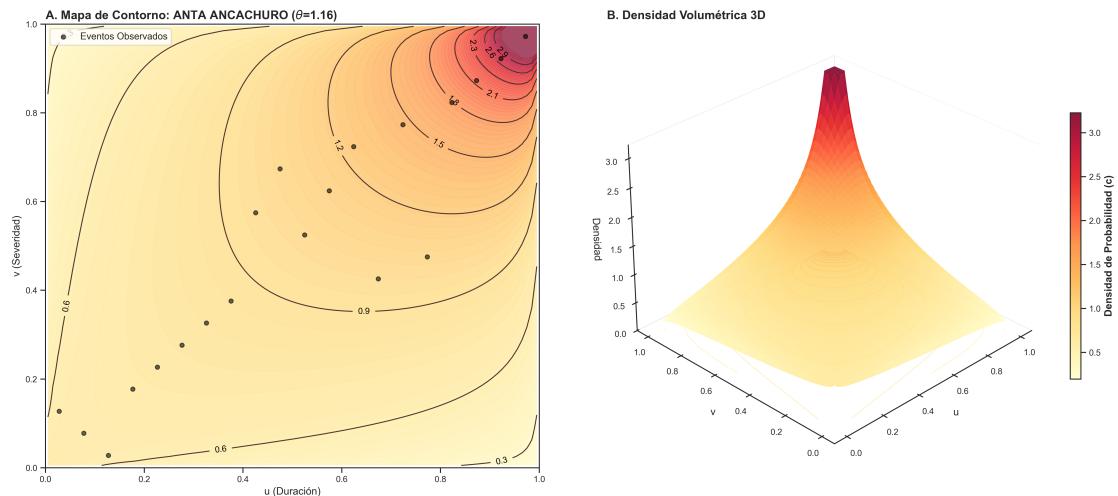


Figura B.3: Isolineas de probabilidad conjunta para la estación Anta Ancachuro.

Análisis de Dependencia Bivariada: AYMARAES - Cúpula Gumbel

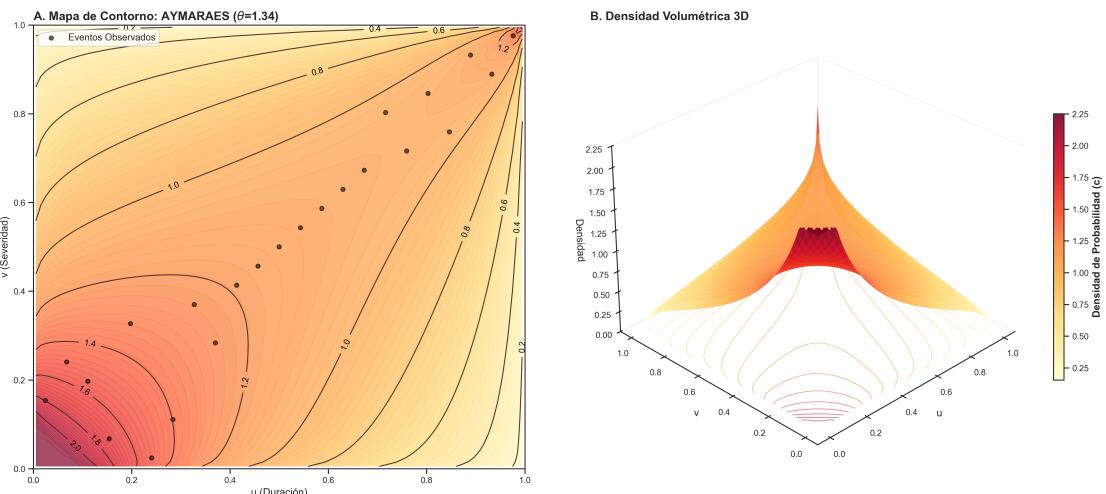


Figura B.4: Isolineas de probabilidad conjunta para la estación Aymaraes.

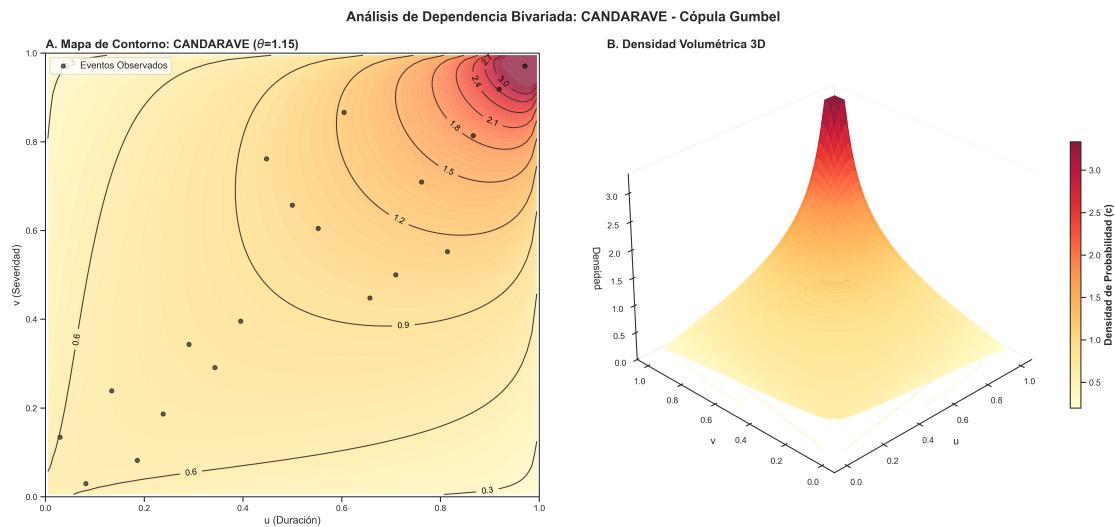


Figura B.5: Isolineas de probabilidad conjunta para la estación Candarave.

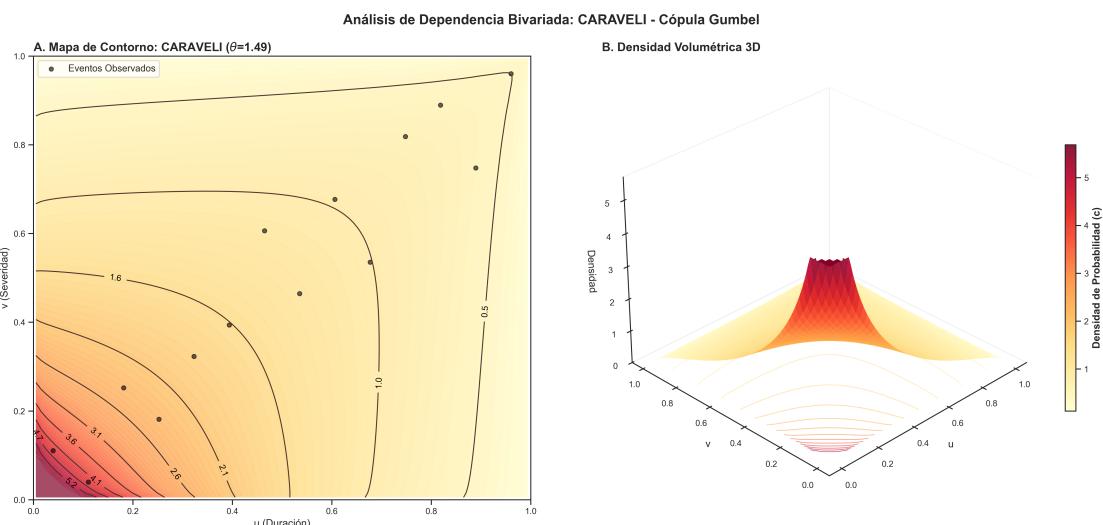


Figura B.6: Isolineas de probabilidad conjunta para la estación Caravelí.

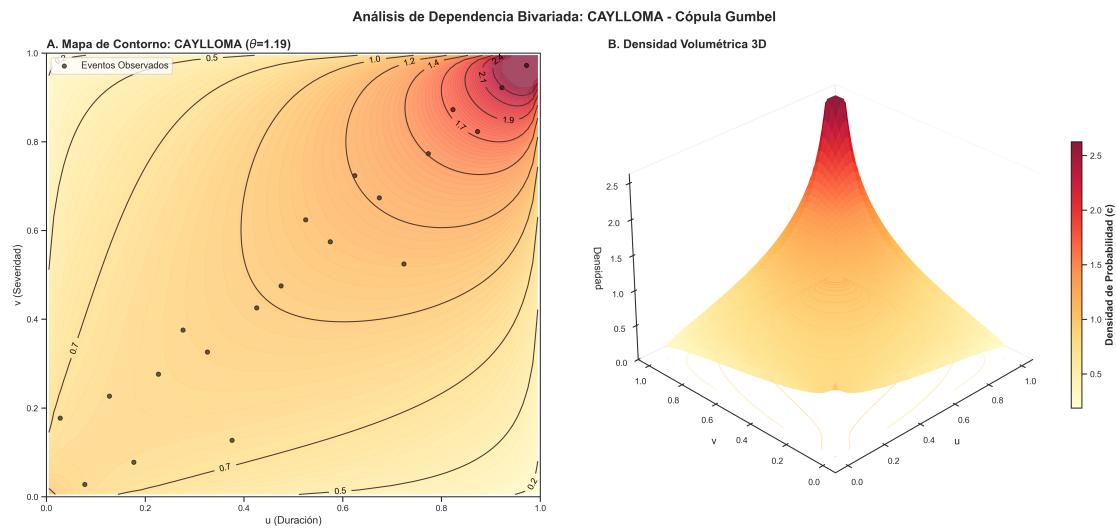


Figura B.7: Isolineas de probabilidad conjunta para la estación Caylloma.

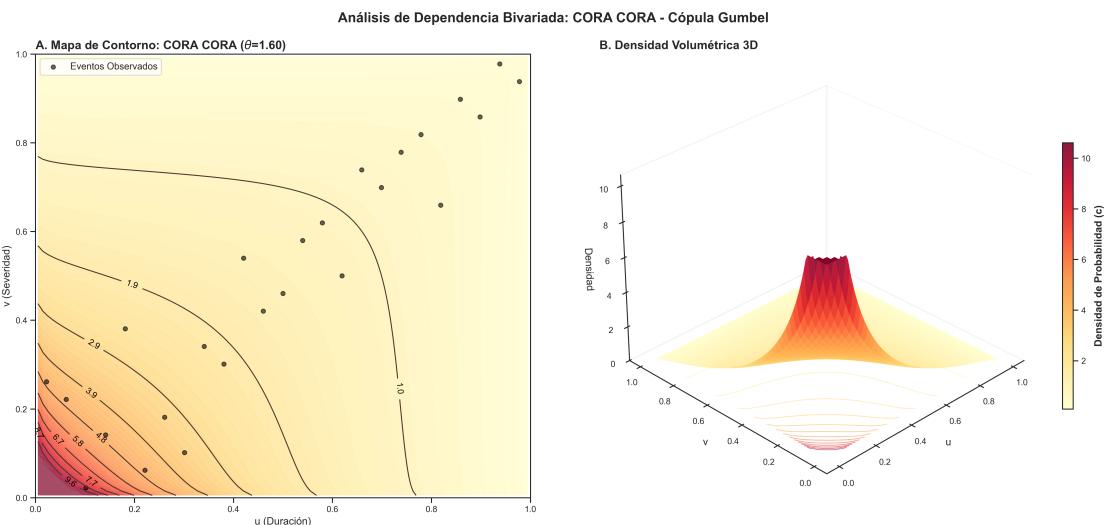


Figura B.8: Isolineas de probabilidad conjunta para la estación Cora Cora.

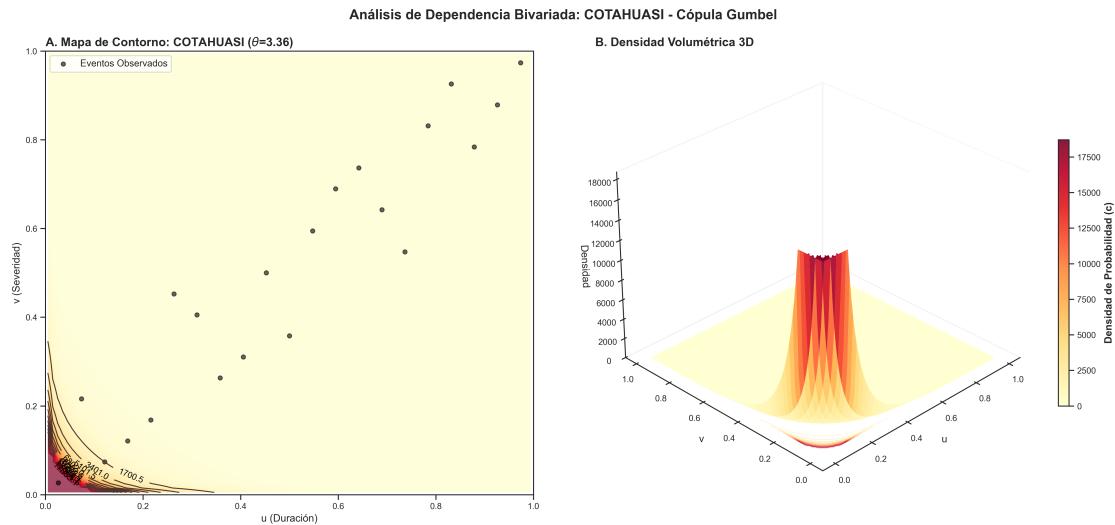


Figura B.9: Isolineas de probabilidad conjunta para la estación Cotahuasi.

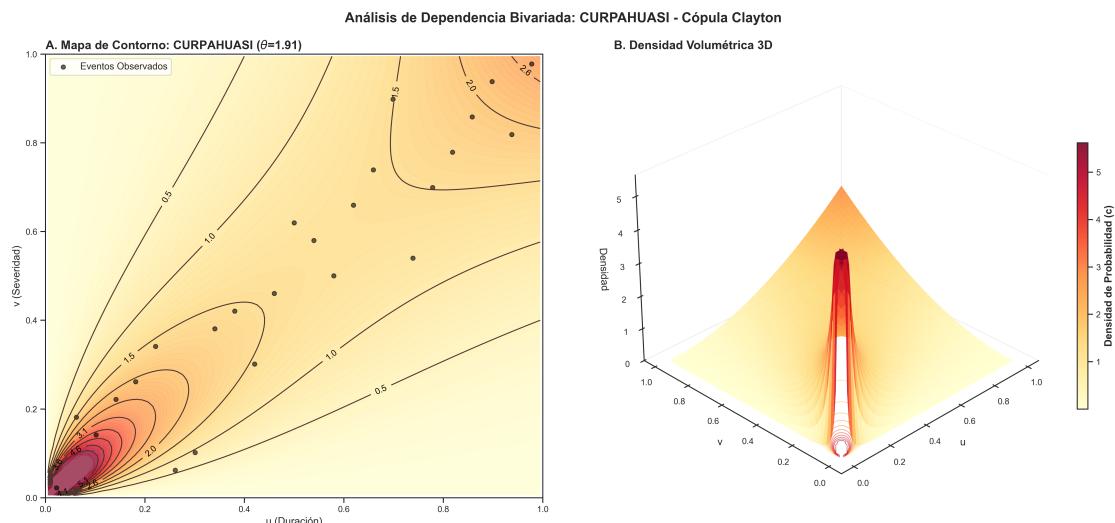


Figura B.10: Isolineas de probabilidad conjunta para la estación Curpahuasi.

Análisis de Dependencia Bivariada: GRANJA KAYRA - Cúpula Gumbel

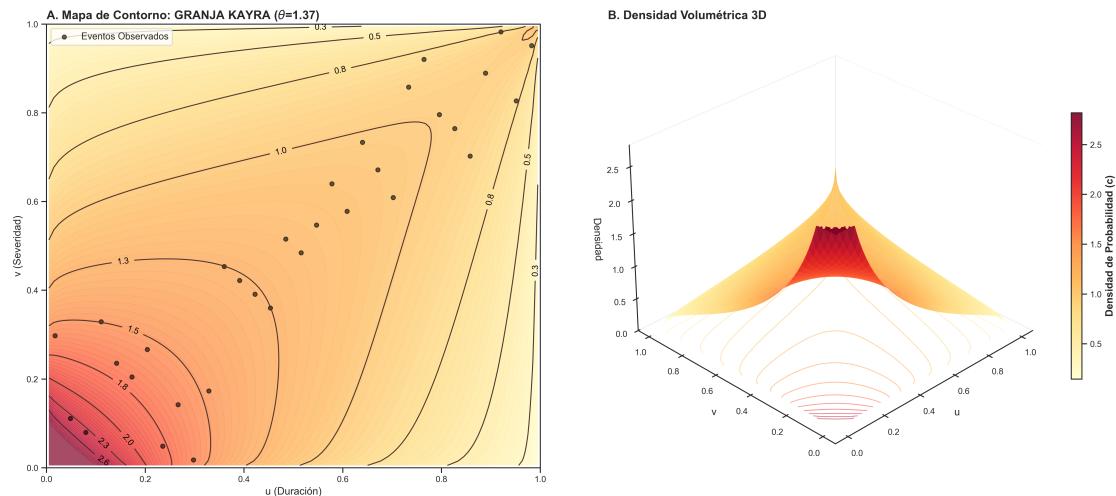


Figura B.11: Isolineas de probabilidad conjunta para la estación Granja Kayra.

Análisis de Dependencia Bivariada: GRANJA SAN ANTONIO - Cúpula Gumbel

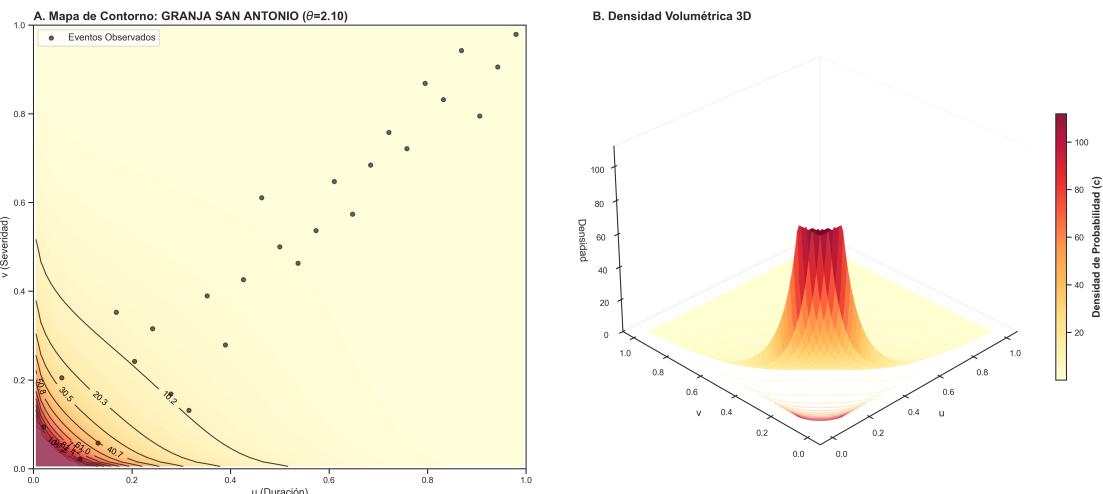


Figura B.12: Isolineas de probabilidad conjunta para la estación Granja San Antonio.

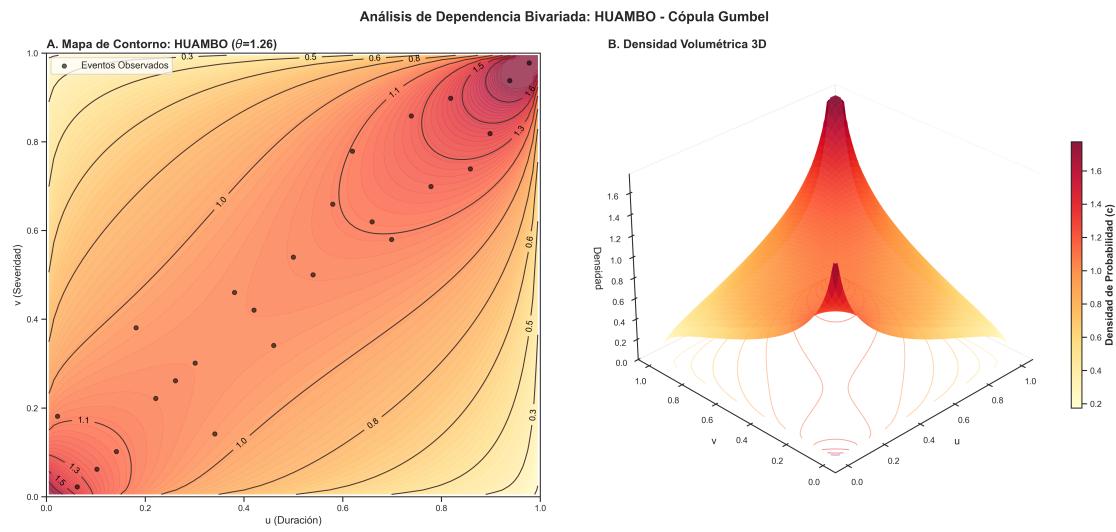


Figura B.13: Isolineas de probabilidad conjunta para la estación Huambo.

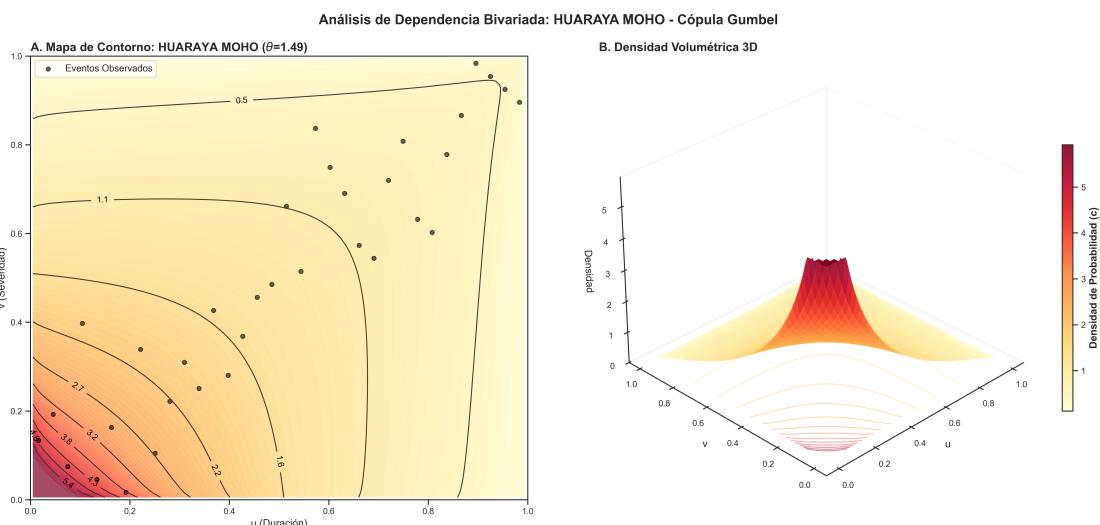


Figura B.14: Isolineas de probabilidad conjunta para la estación Huaraya Moho.

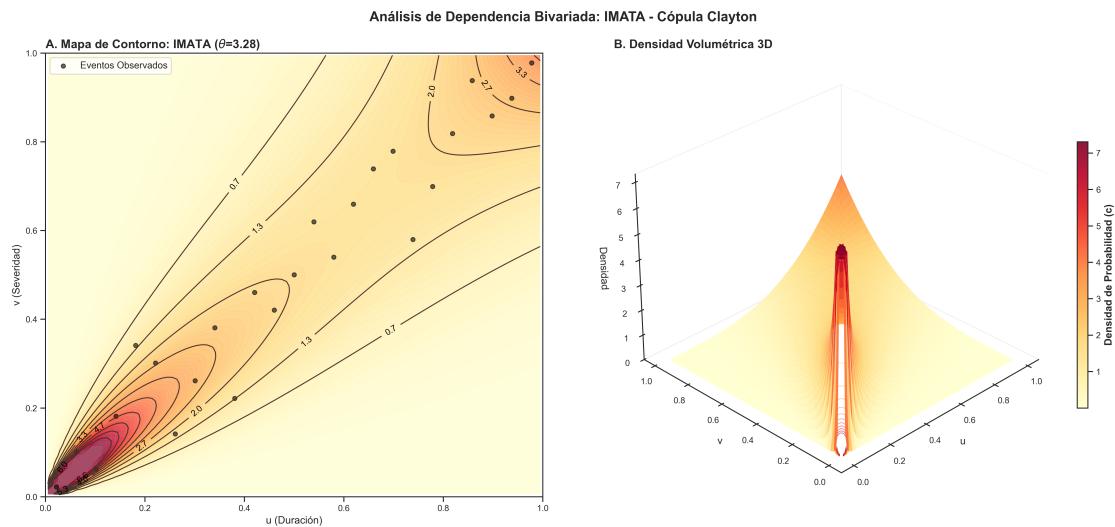


Figura B.15: Isolineas de probabilidad conjunta para la estación Imata.

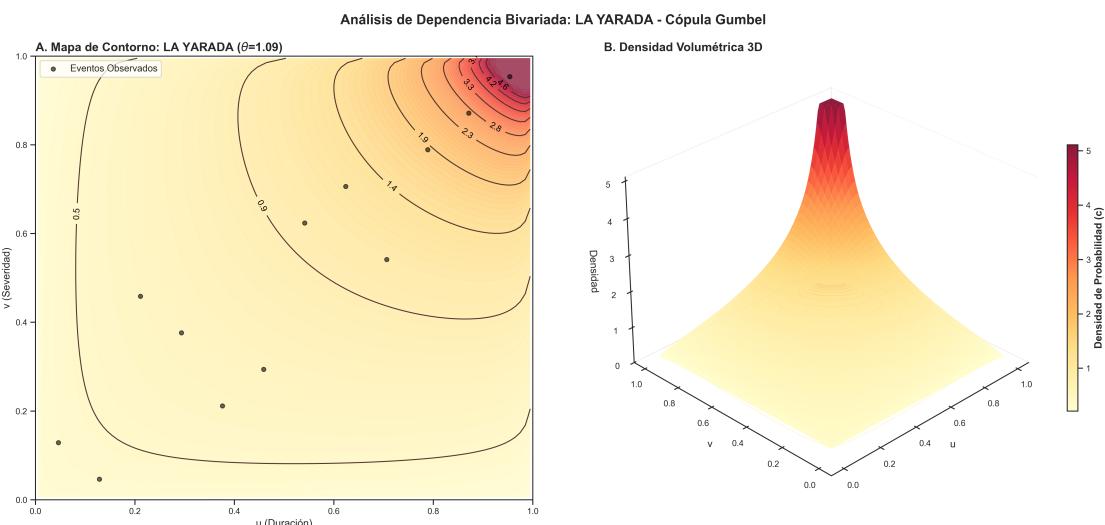


Figura B.16: Isolineas de probabilidad conjunta para la estación La Yarada.

Análisis de Dependencia Bivariada: MACUSANI - Cúpula Gumbel

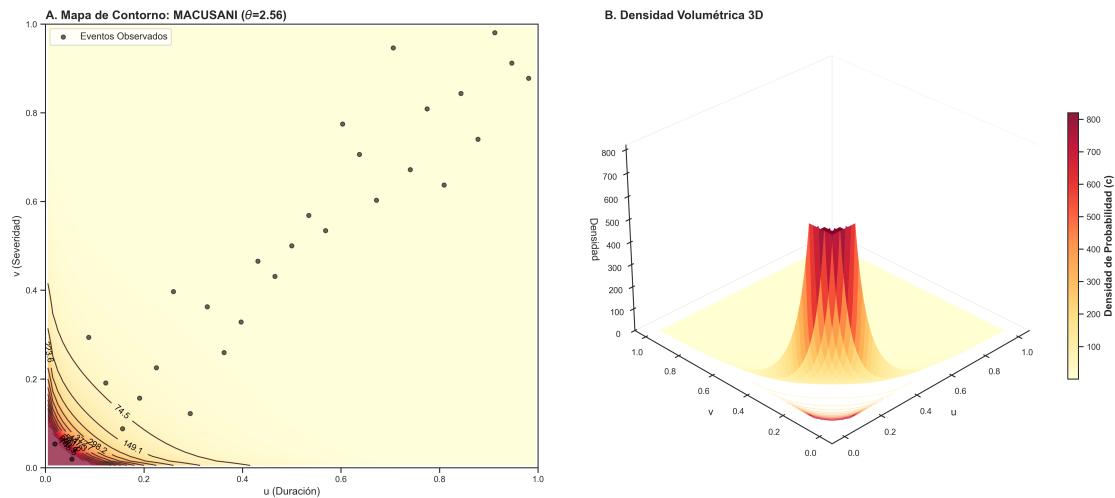


Figura B.17: Isolineas de probabilidad conjunta para la estación Macusani.

Análisis de Dependencia Bivariada: MAÑAZO - Cúpula Clayton

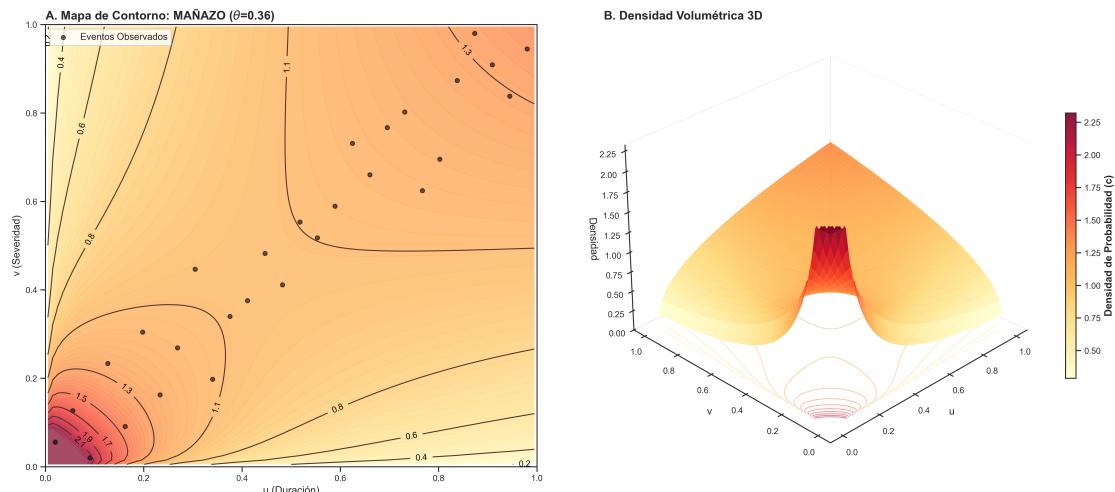


Figura B.18: Isolineas de probabilidad conjunta para la estación Mañazo.

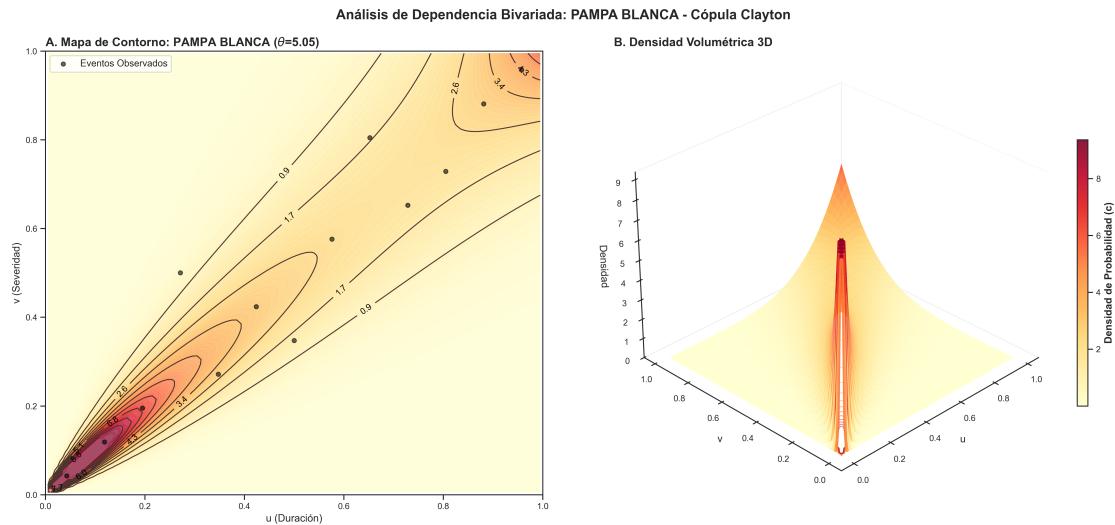


Figura B.19: Isolineas de probabilidad conjunta para la estación Pampa Blanca.

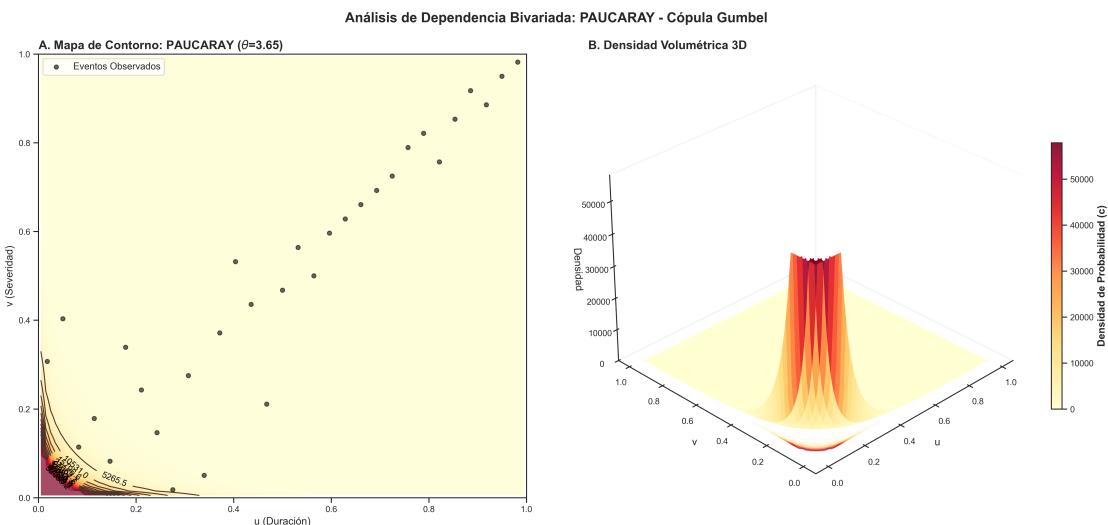


Figura B.20: Isolineas de probabilidad conjunta para la estación Paucaray.

Análisis de Dependencia Bivariada: PIZACOMA - Cúpula Gumbel

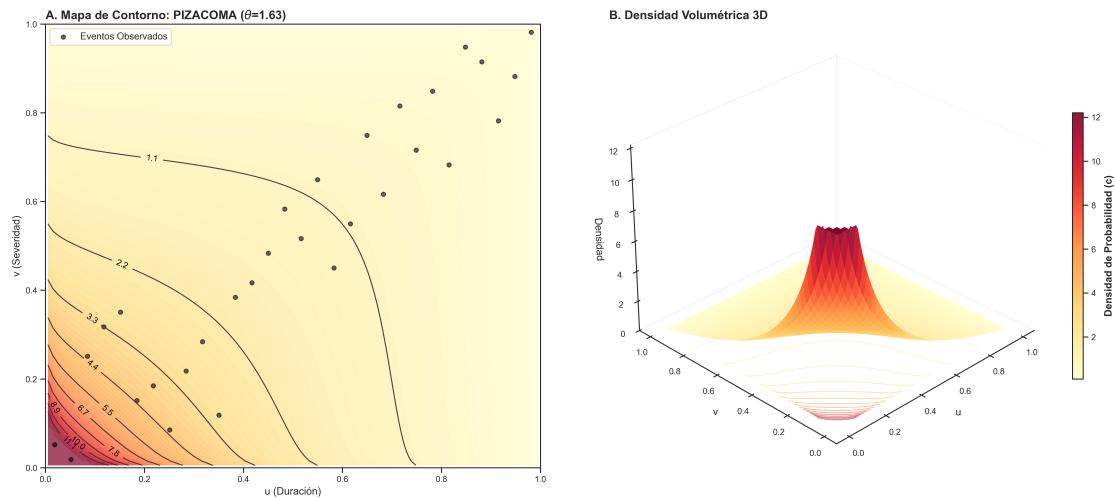


Figura B.21: Isolineas de probabilidad conjunta para la estación Pizacoma.

Análisis de Dependencia Bivariada: PUCARA - Cúpula Gumbel

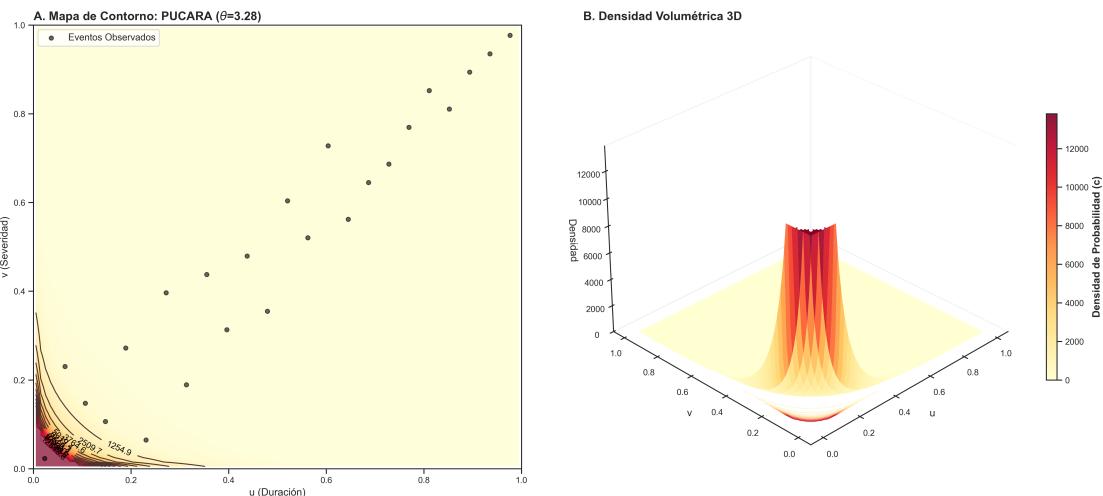


Figura B.22: Isolineas de probabilidad conjunta para la estación Pucará.

Análisis de Dependencia Bivariada: PUNTA ATICO - Cúpula Gumbel

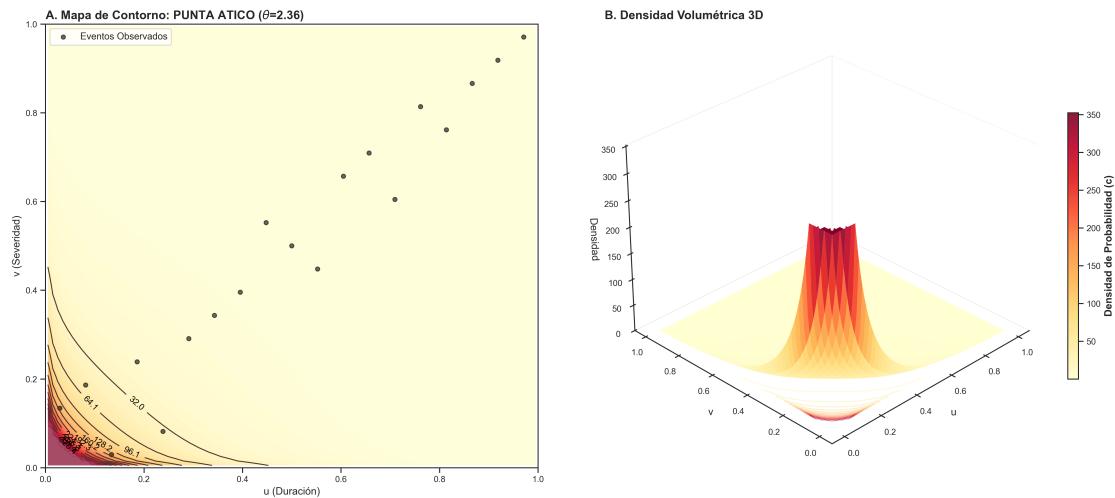


Figura B.23: Isolineas de probabilidad conjunta para la estación Punta Atico.

Análisis de Dependencia Bivariada: PUNTA COLES - Cúpula Gumbel

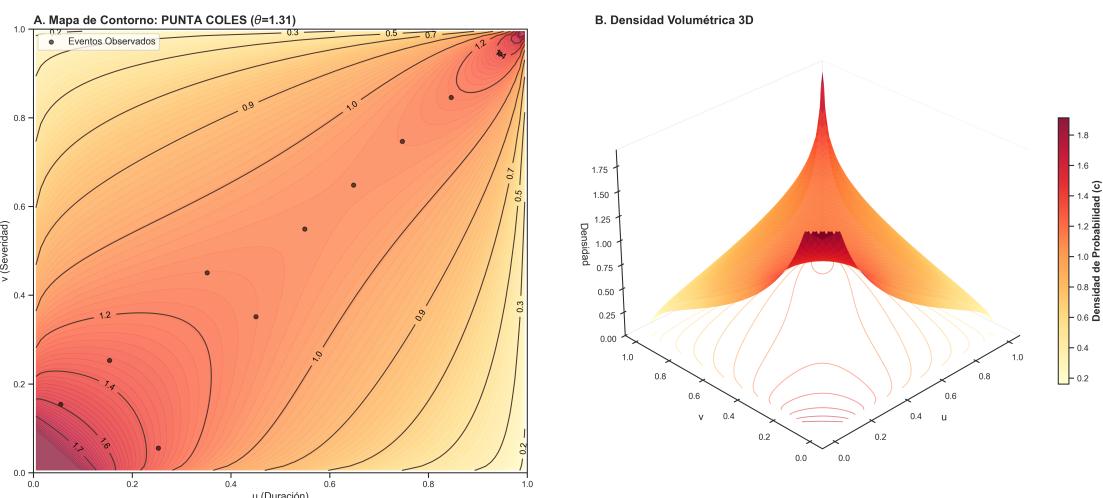


Figura B.24: Isolineas de probabilidad conjunta para la estación Punta Coles.

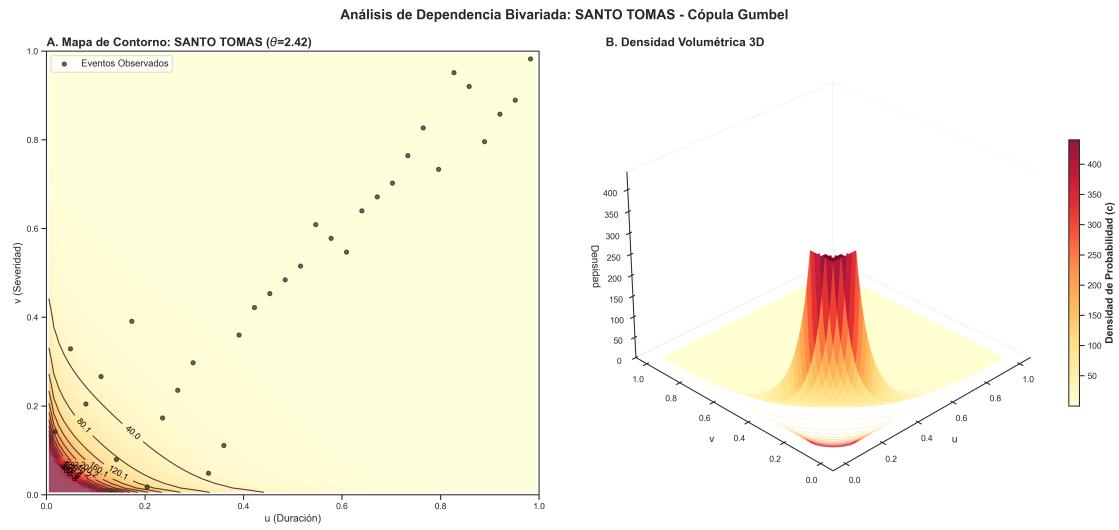


Figura B.25: Isolineas de probabilidad conjunta para la estación Santo Tomás.

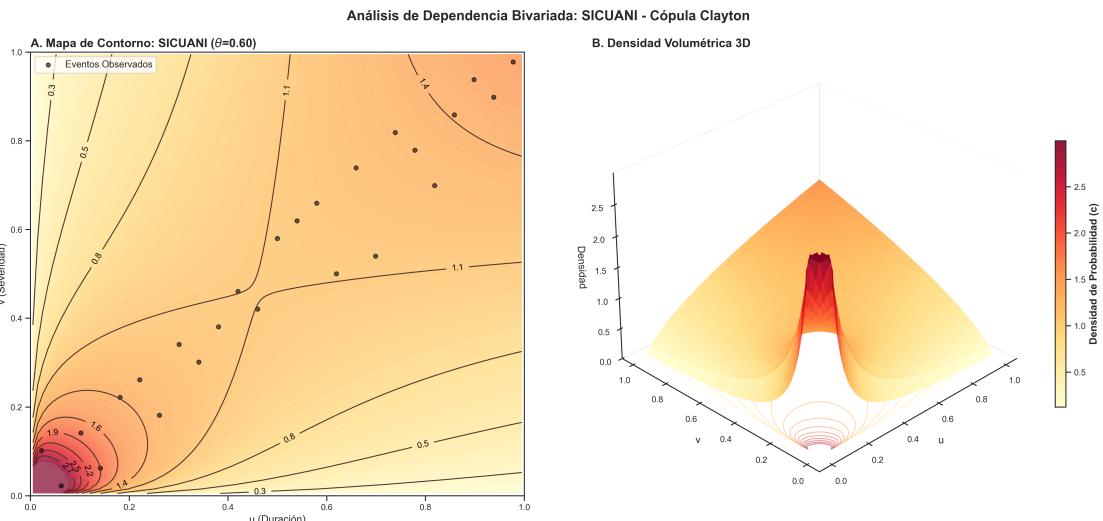


Figura B.26: Isolineas de probabilidad conjunta para la estación Sicuani.

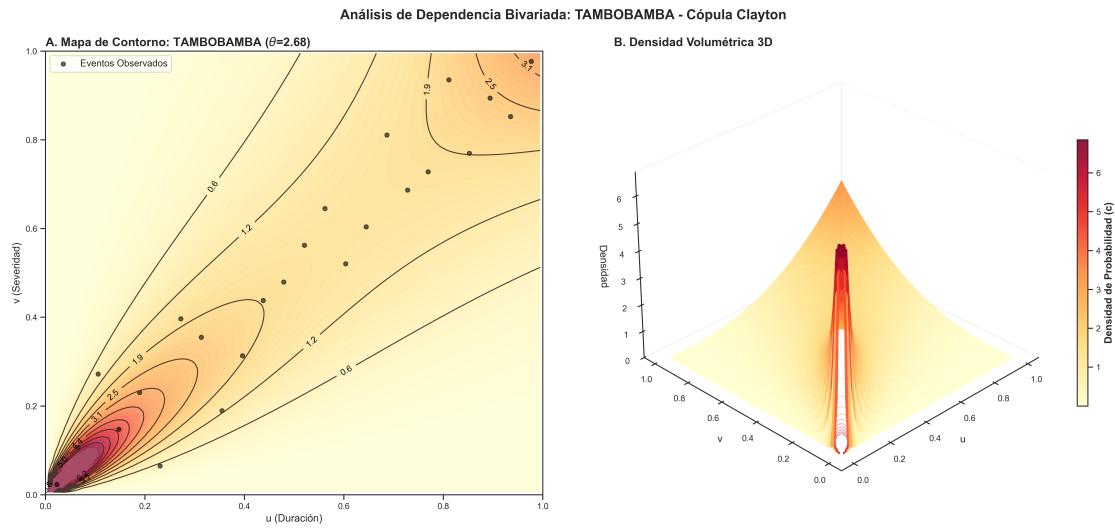


Figura B.27: Isolineas de probabilidad conjunta para la estación Tambobamba.

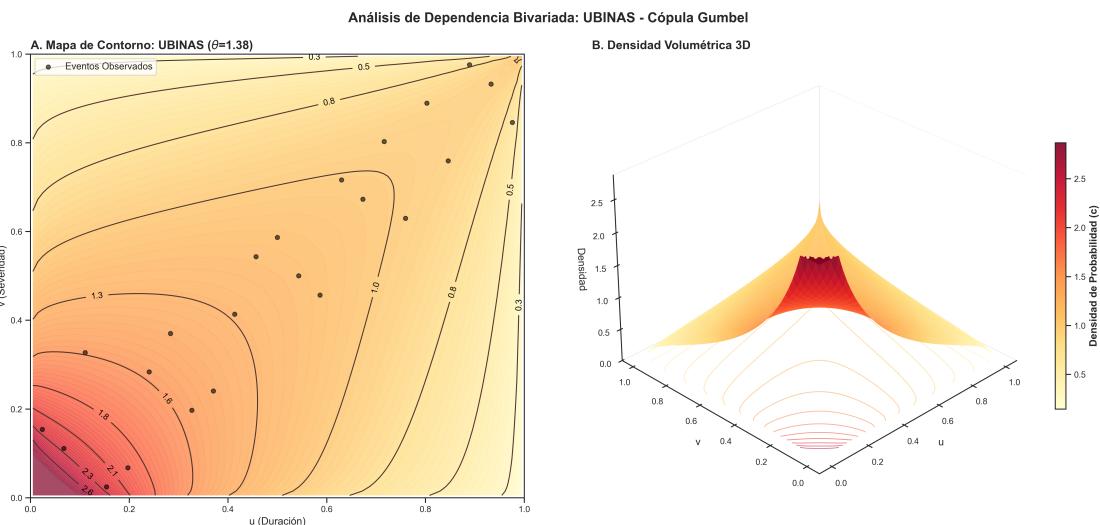


Figura B.28: Isolineas de probabilidad conjunta para la estación Ubinas.

Capítulo C

Gráficos de Periodos de Retorno Conjunto

En este anexo se presentan las curvas de periodo de retorno conjunto (And/Or) estimadas a partir de las cópulas seleccionadas para cada estación. Estas gráficas permiten evaluar la probabilidad de excedencia simultánea de la duración y severidad.

Curvas de Periodo de Retorno Conjunto: ANANEA

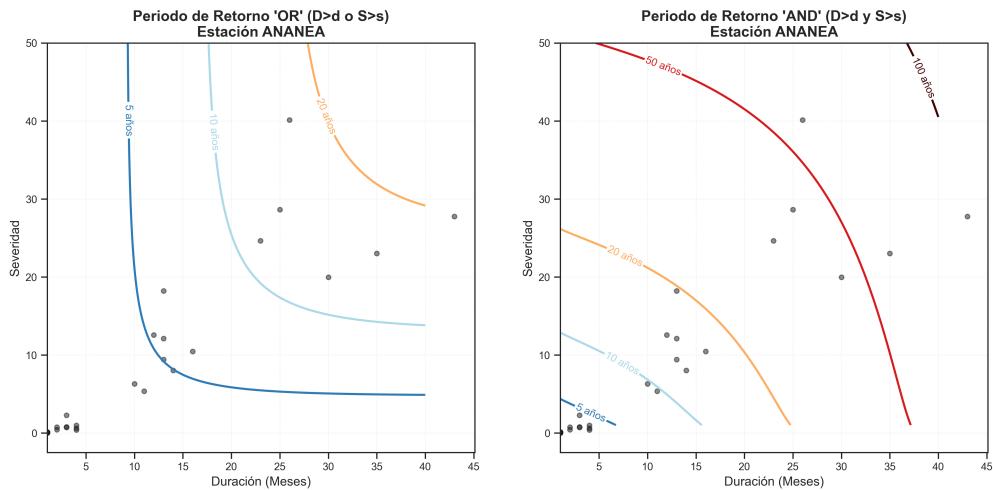


Figura C.1: Periodos de retorno conjunto para la estación Ananea.

Curvas de Periodo de Retorno Conjunto: ANDAHUAYLAS

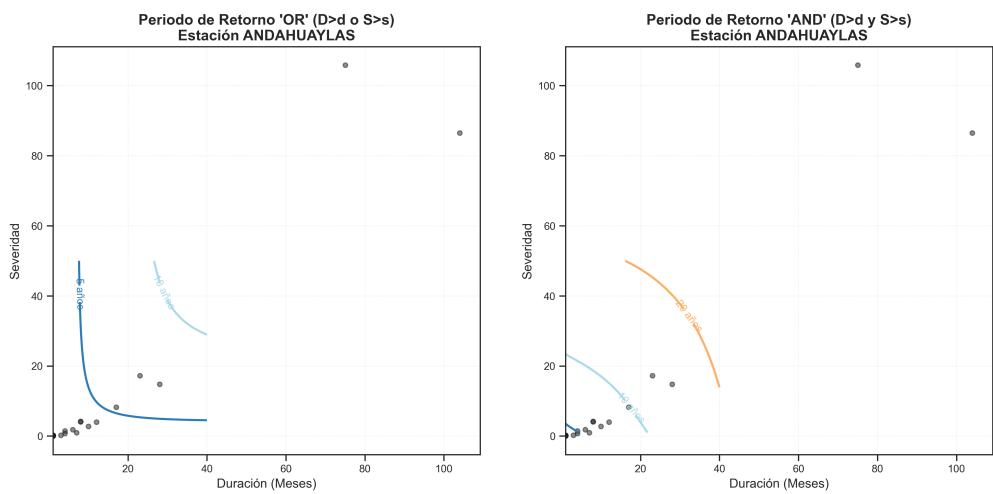


Figura C.2: Periodos de retorno conjunto para la estación Andahuaylas.

Curvas de Periodo de Retorno Conjunto: ANTA ANCACHURO

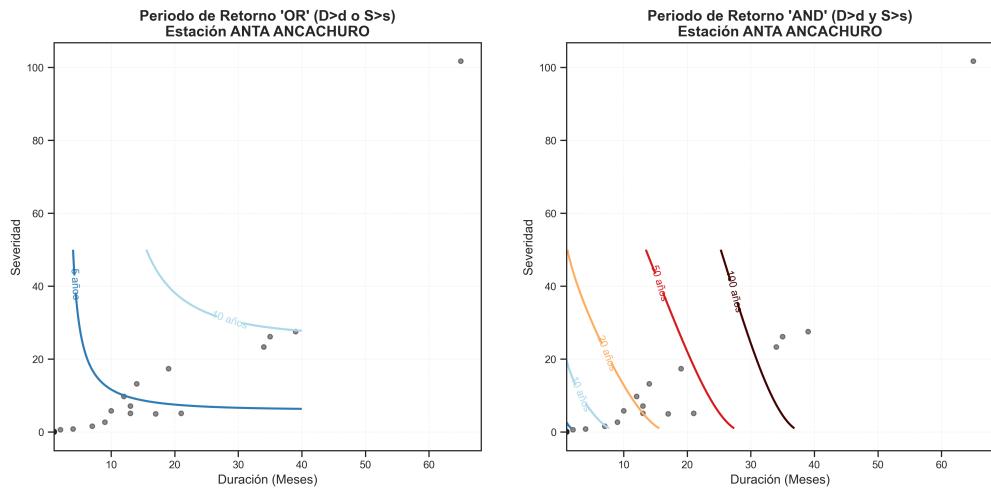


Figura C.3: Periodos de retorno conjunto para la estación Anta Ancachuro.

Curvas de Periodo de Retorno Conjunto: AYMARAES

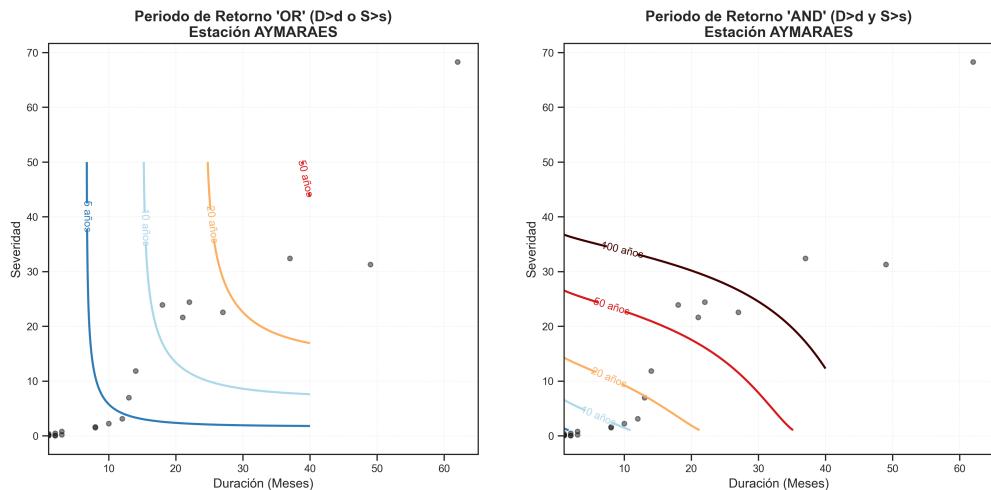


Figura C.4: Periodos de retorno conjunto para la estación Aymaraes.

Curvas de Periodo de Retorno Conjunto: CANDARAVE

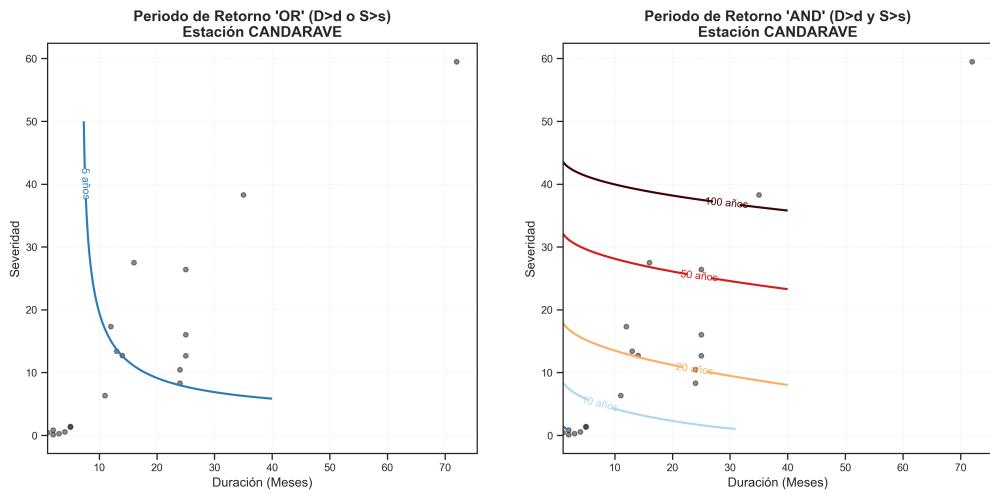


Figura C.5: Periodos de retorno conjunto para la estación Candarave.

Curvas de Periodo de Retorno Conjunto: CARAVELI

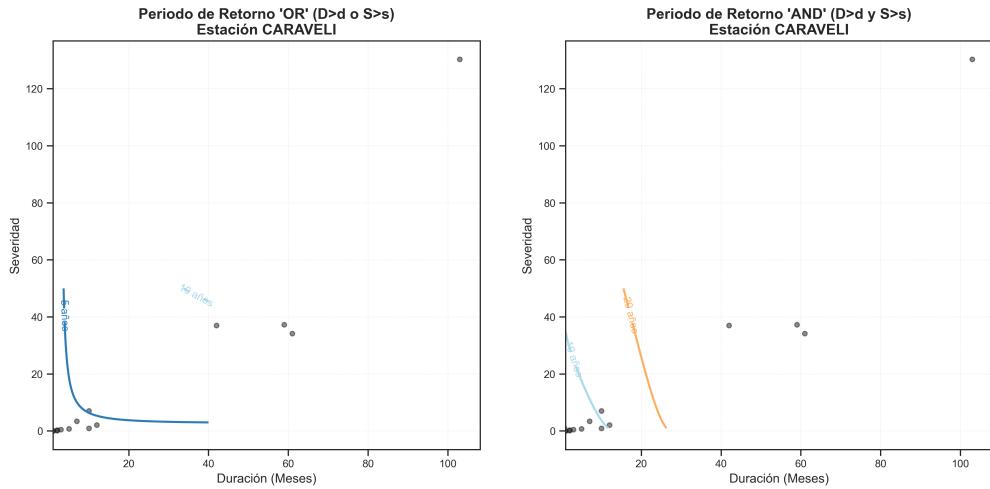


Figura C.6: Periodos de retorno conjunto para la estación Caravelí.

Curvas de Periodo de Retorno Conjunto: CAYLLOMA

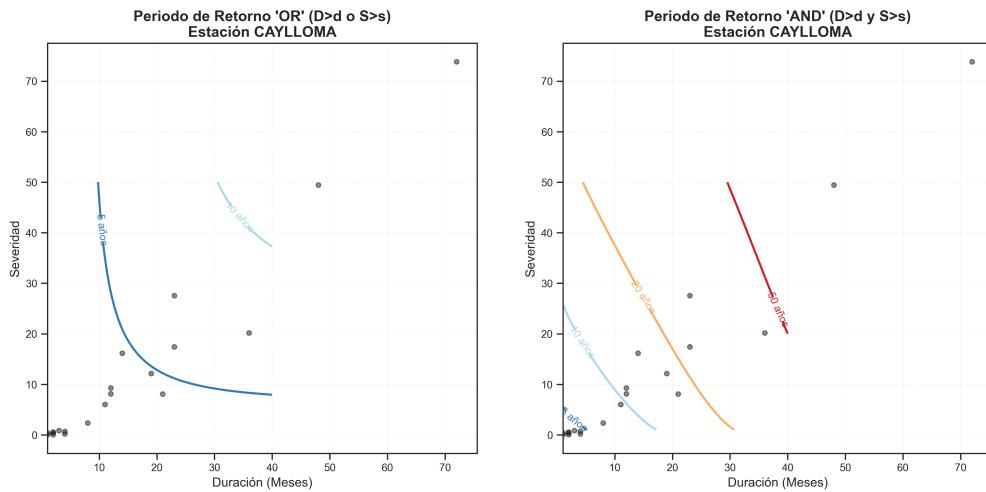


Figura C.7: Periodos de retorno conjunto para la estación Caylloma.

Curvas de Periodo de Retorno Conjunto: CORA CORA

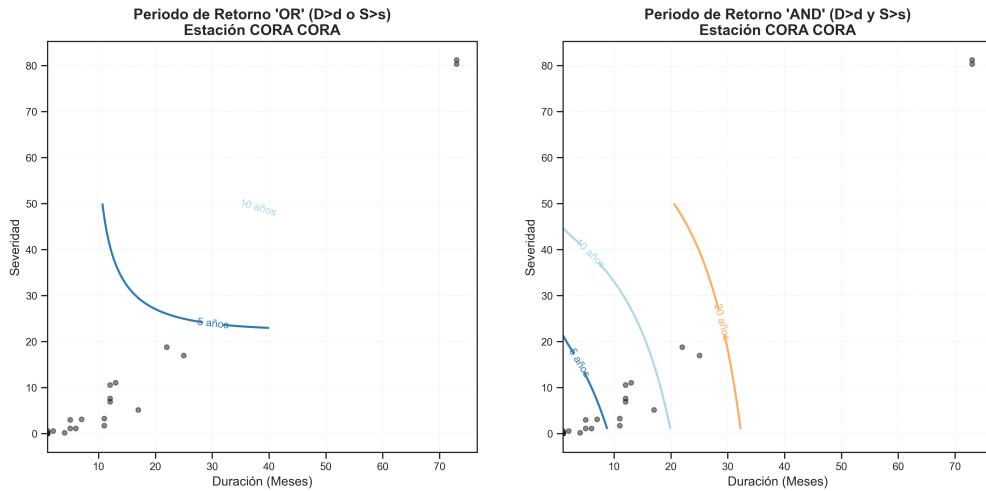


Figura C.8: Periodos de retorno conjunto para la estación Cora Cora.

Curvas de Periodo de Retorno Conjunto: COTAHUASI

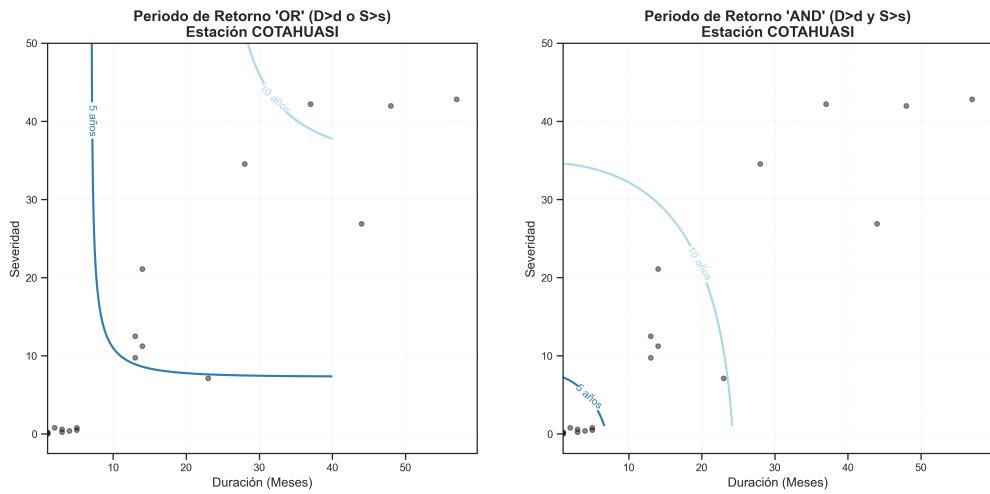


Figura C.9: Periodos de retorno conjunto para la estación Cotahuasi.

Curvas de Periodo de Retorno Conjunto: CURPAHUASI

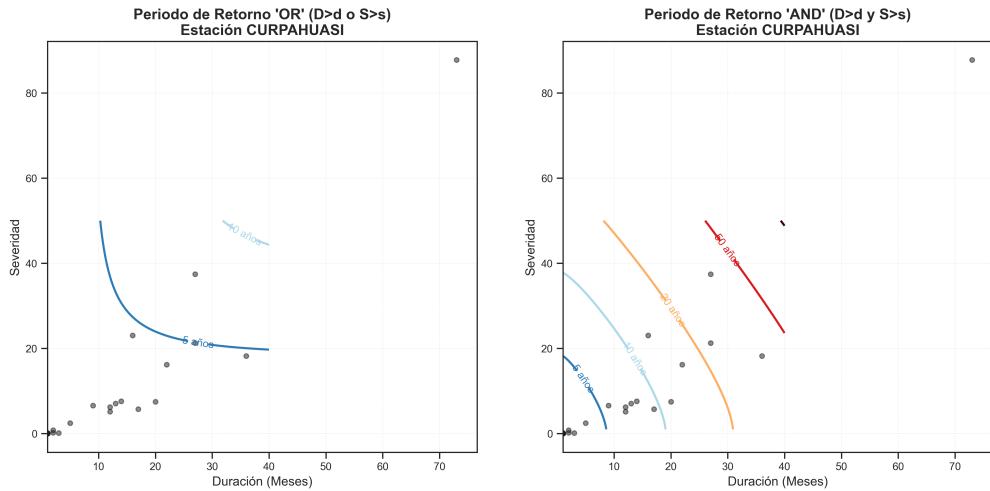


Figura C.10: Periodos de retorno conjunto para la estación Curpahuasi.

Curvas de Periodo de Retorno Conjunto: GRANJA KAYRA

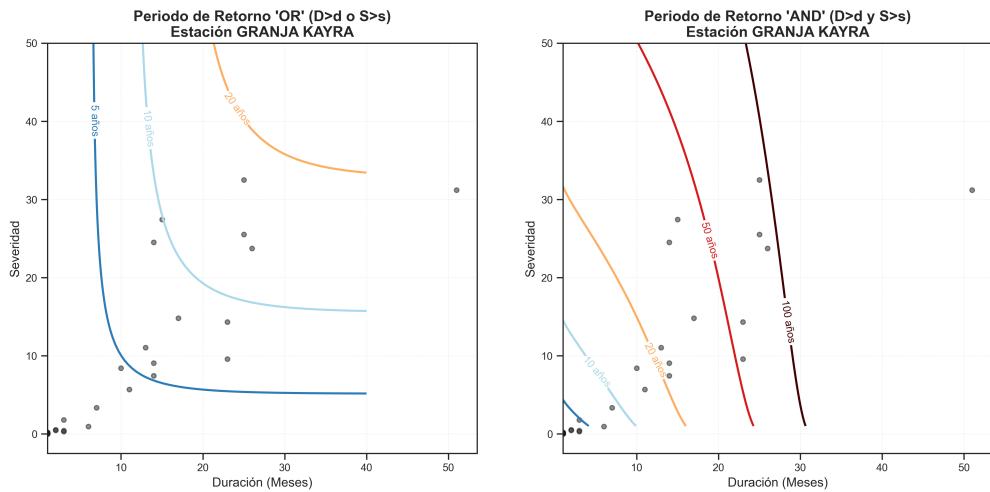


Figura C.11: Periodos de retorno conjunto para la estación Granja Kayra.

Curvas de Periodo de Retorno Conjunto: GRANJA SAN ANTONIO

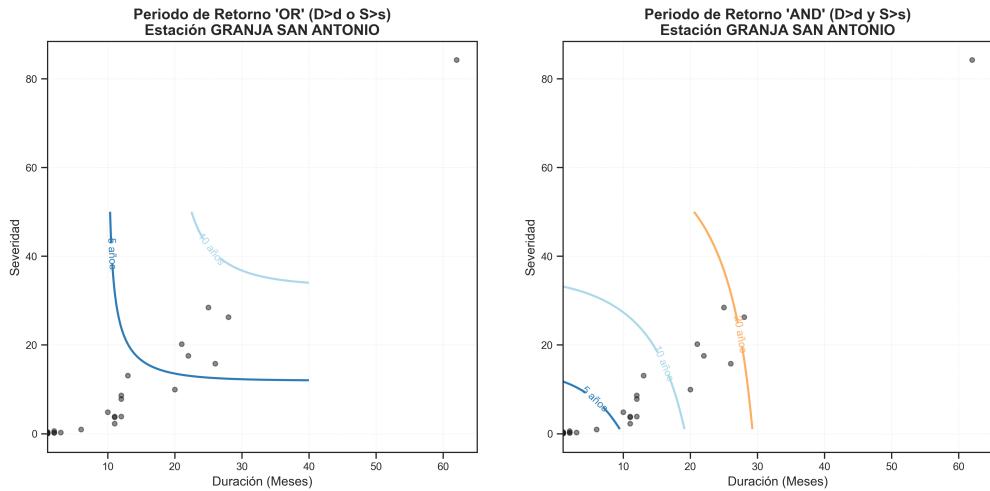


Figura C.12: Periodos de retorno conjunto para la estación Granja San Antonio.

Curvas de Periodo de Retorno Conjunto: HUAMBO

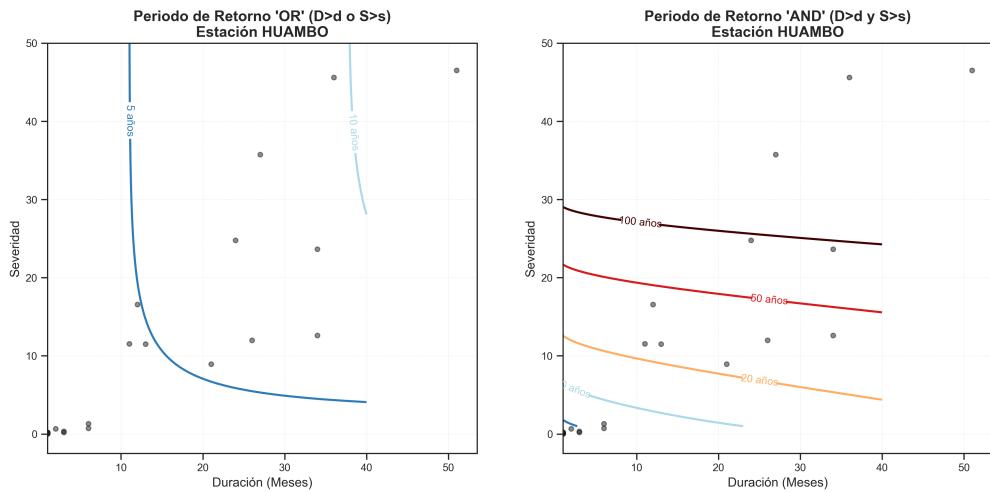


Figura C.13: Periodos de retorno conjunto para la estación Huambo.

Curvas de Periodo de Retorno Conjunto: HUARAYA MOHO

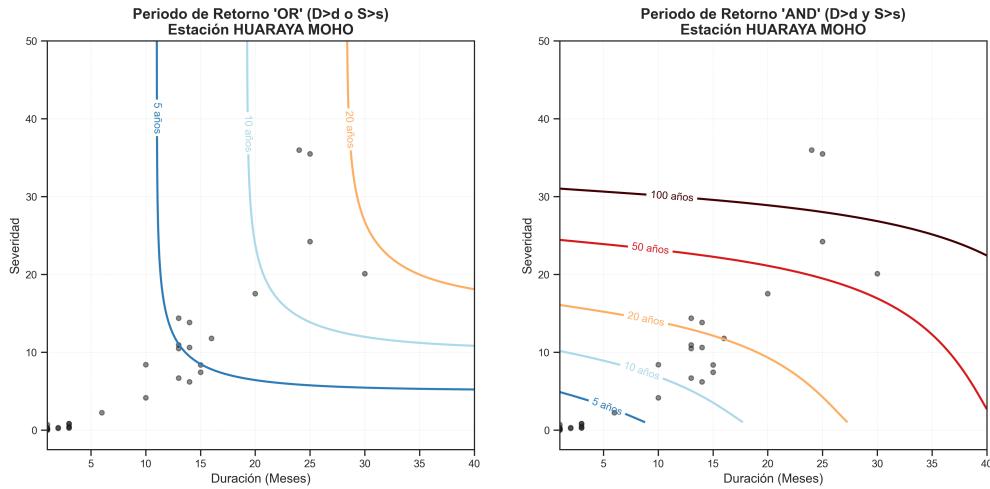


Figura C.14: Periodos de retorno conjunto para la estación Huaraya Moho.

Curvas de Periodo de Retorno Conjunto: IMATA

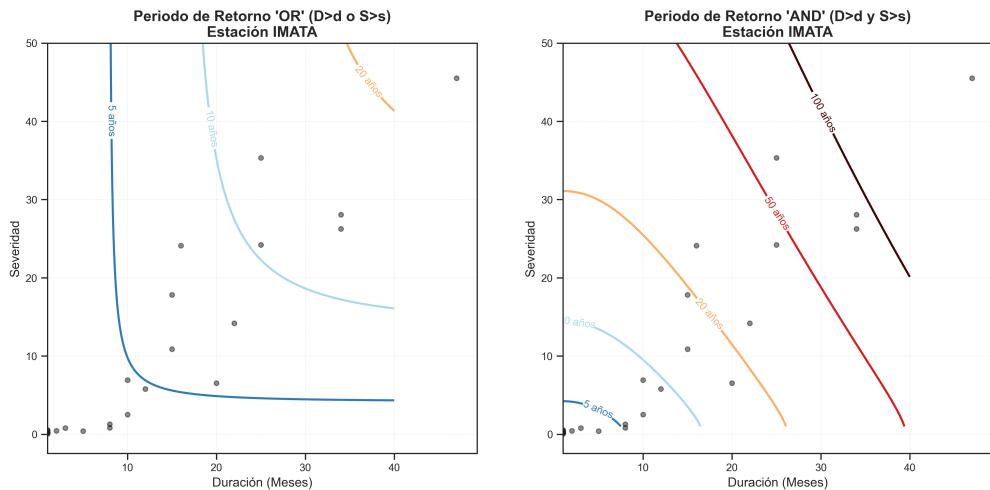


Figura C.15: Periodos de retorno conjunto para la estación Imata.

Curvas de Periodo de Retorno Conjunto: LA YARADA

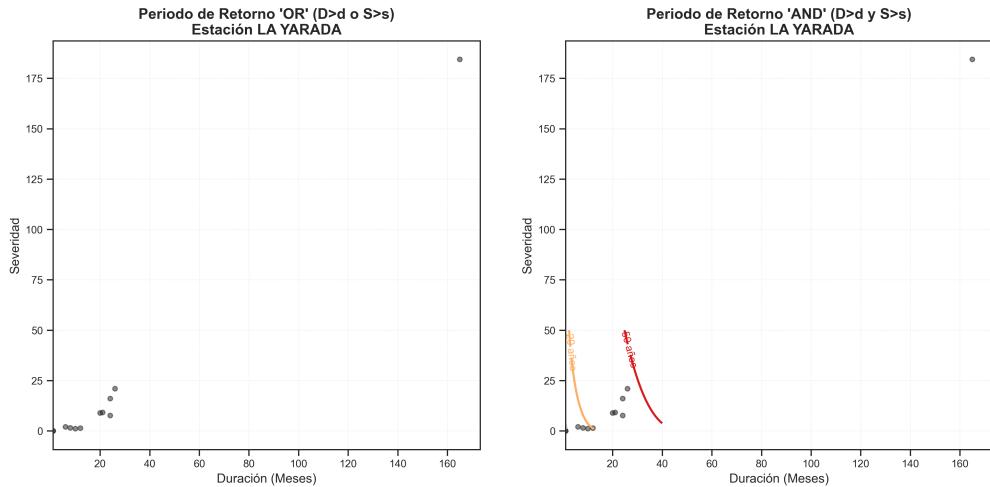


Figura C.16: Periodos de retorno conjunto para la estación La Yarada.

Curvas de Periodo de Retorno Conjunto: MACUSANI

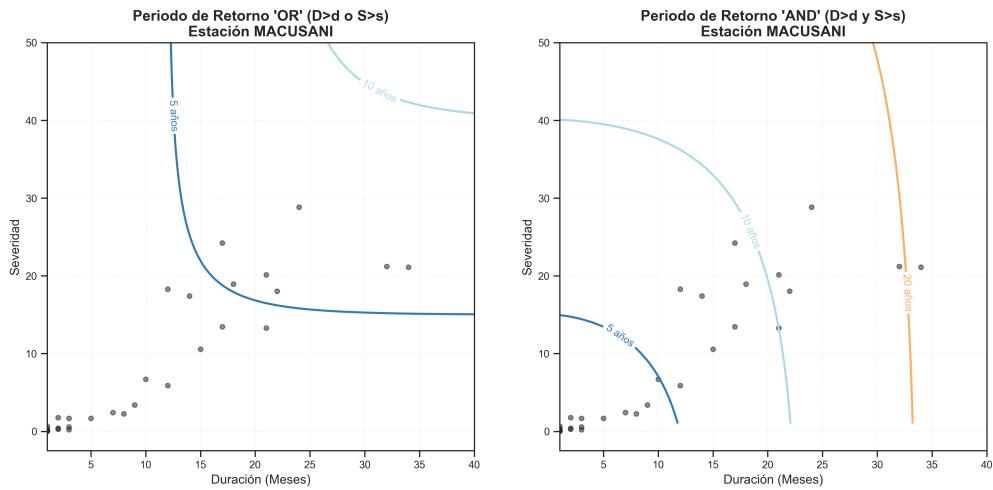


Figura C.17: Periodos de retorno conjunto para la estación Macusani.

Curvas de Periodo de Retorno Conjunto: MAÑAZO

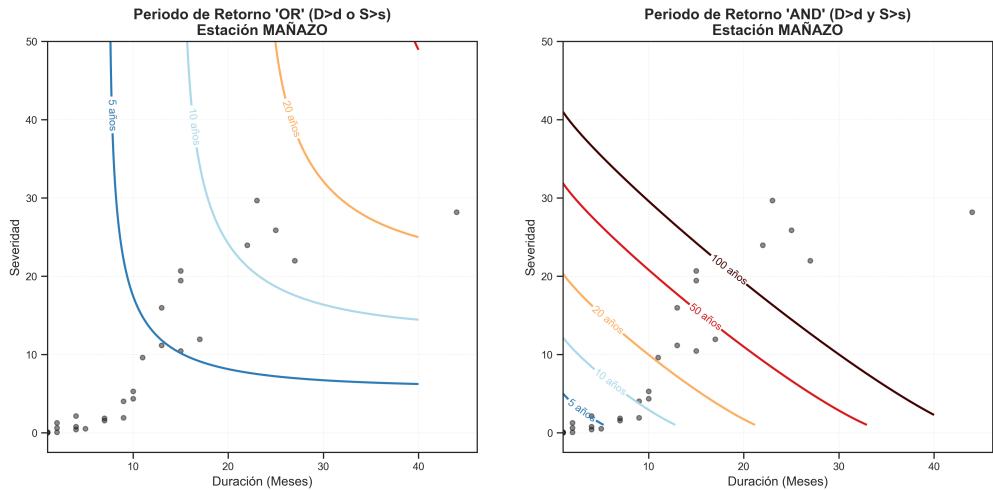


Figura C.18: Periodos de retorno conjunto para la estación Mañazo.

Curvas de Periodo de Retorno Conjunto: PAMPA BLANCA

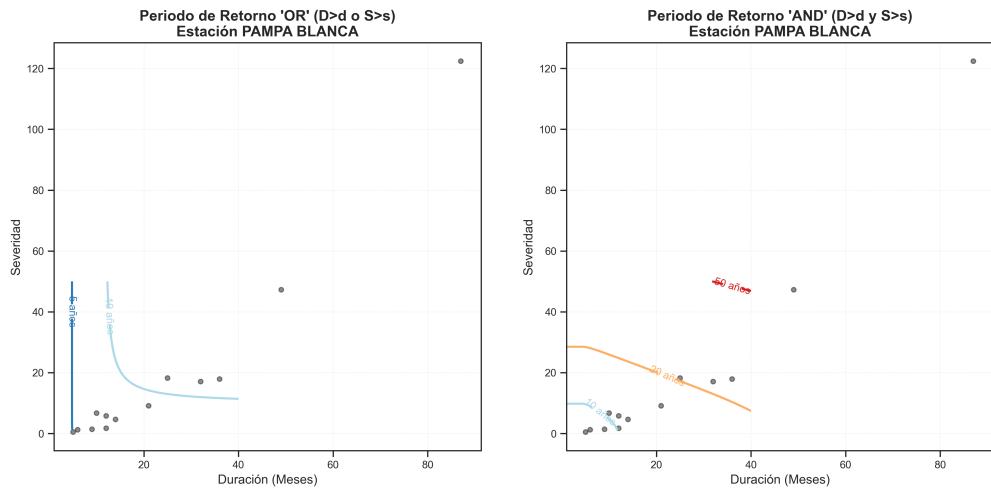


Figura C.19: Periodos de retorno conjunto para la estación Pampa Blanca.

Curvas de Periodo de Retorno Conjunto: PAUCARAY

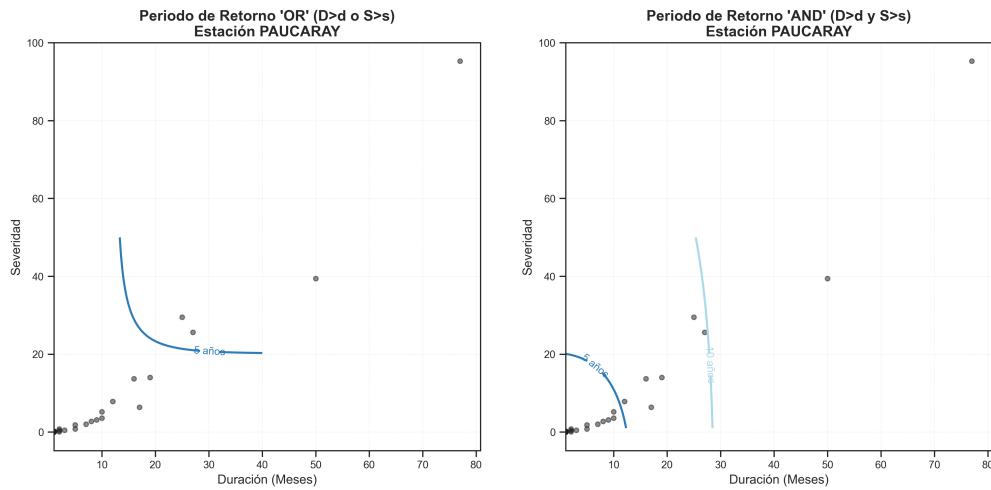


Figura C.20: Periodos de retorno conjunto para la estación Paucaray.

Curvas de Periodo de Retorno Conjunto: PIZACOMA

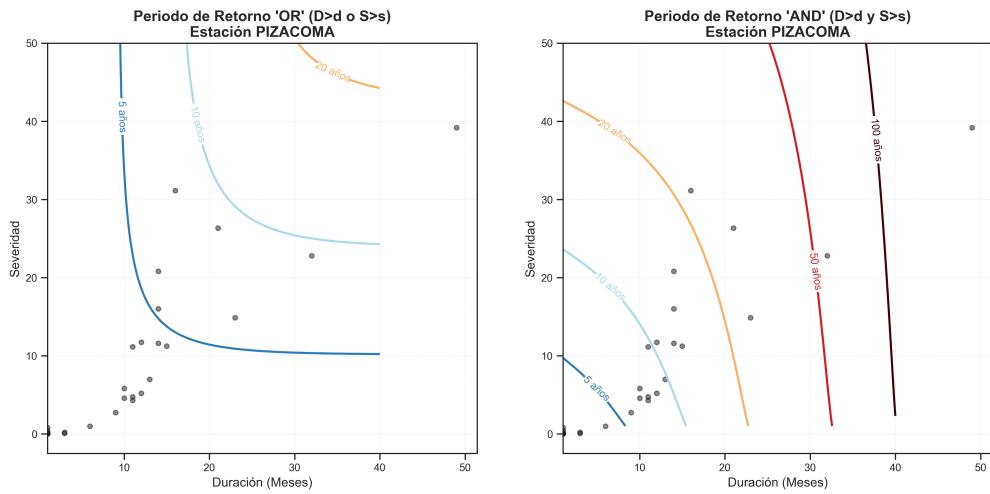


Figura C.21: Periodos de retorno conjunto para la estación Pizacoma.

Curvas de Periodo de Retorno Conjunto: PUCARA

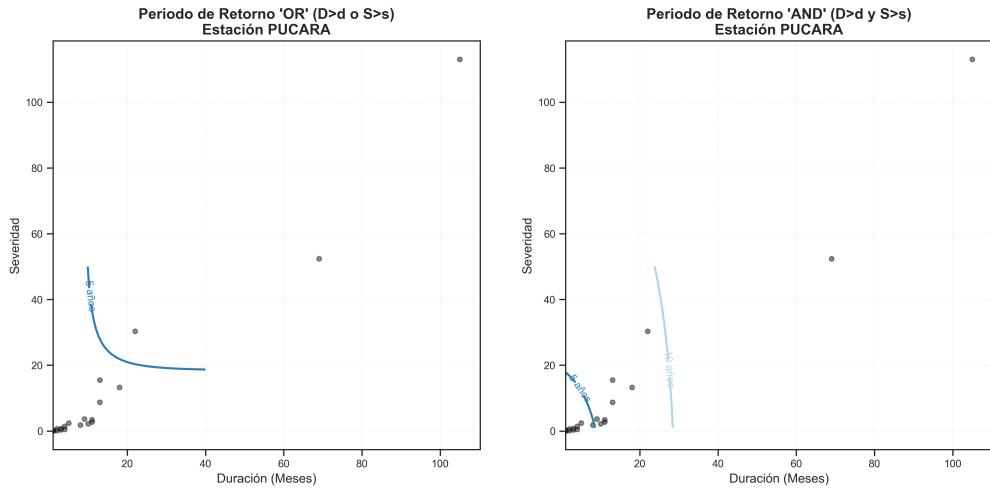


Figura C.22: Periodos de retorno conjunto para la estación Pucará.

Curvas de Periodo de Retorno Conjunto: PUNTA ATICO

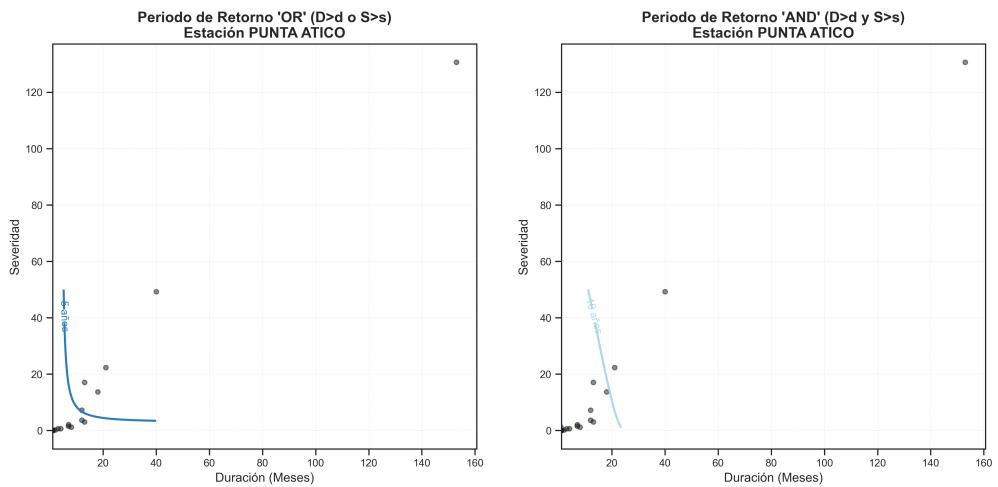


Figura C.23: Periodos de retorno conjunto para la estación Punta Atico.

Curvas de Periodo de Retorno Conjunto: PUNTA COLES

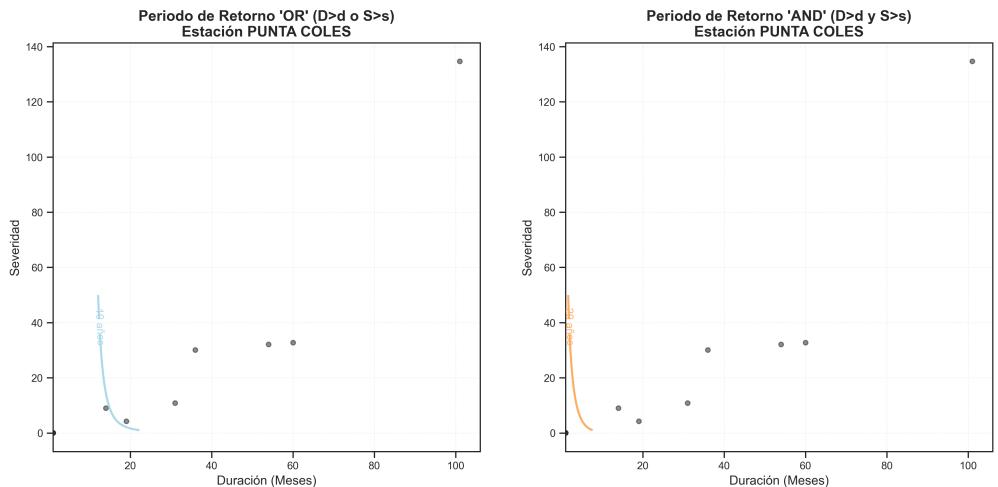


Figura C.24: Periodos de retorno conjunto para la estación Punta Coles.

Curvas de Periodo de Retorno Conjunto: SANTO TOMAS

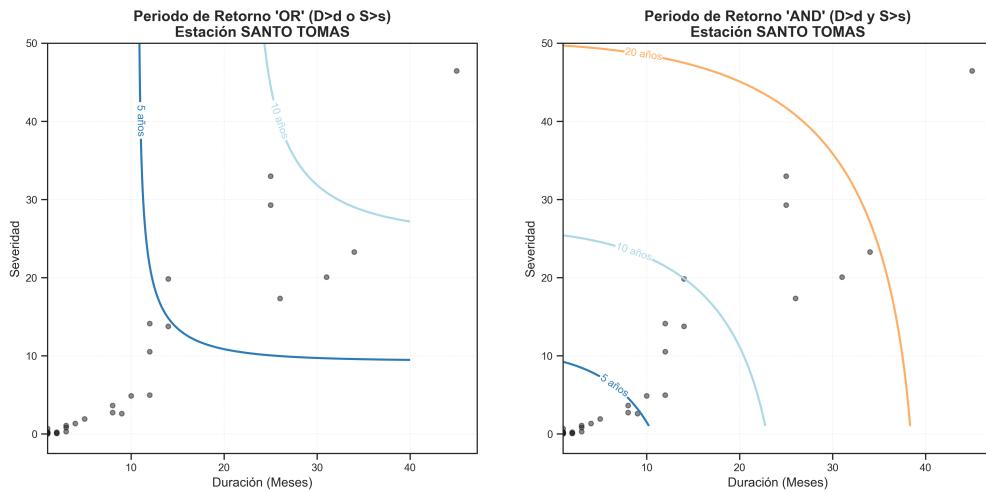


Figura C.25: Periodos de retorno conjunto para la estación Santo Tomás.

Curvas de Periodo de Retorno Conjunto: SICUANI

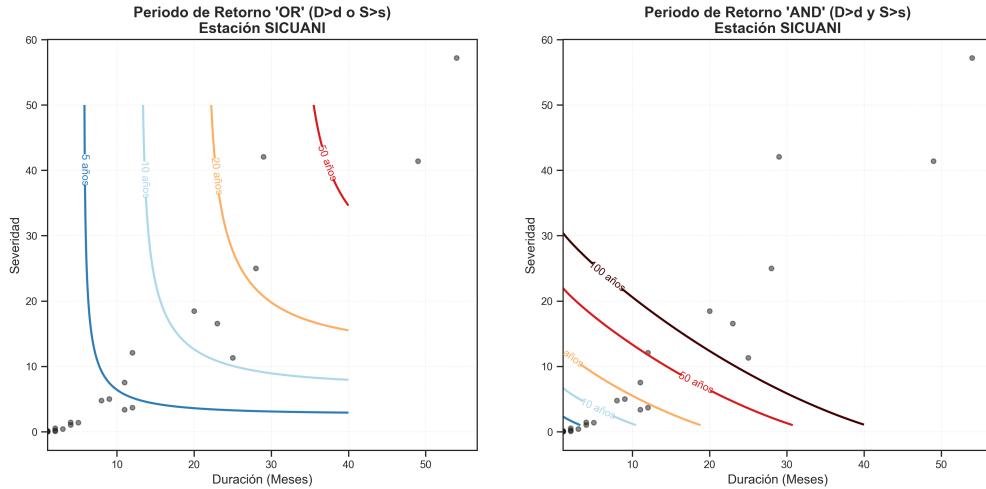


Figura C.26: Periodos de retorno conjunto para la estación Sicuani.

Curvas de Periodo de Retorno Conjunto: TAMBOBAMBA

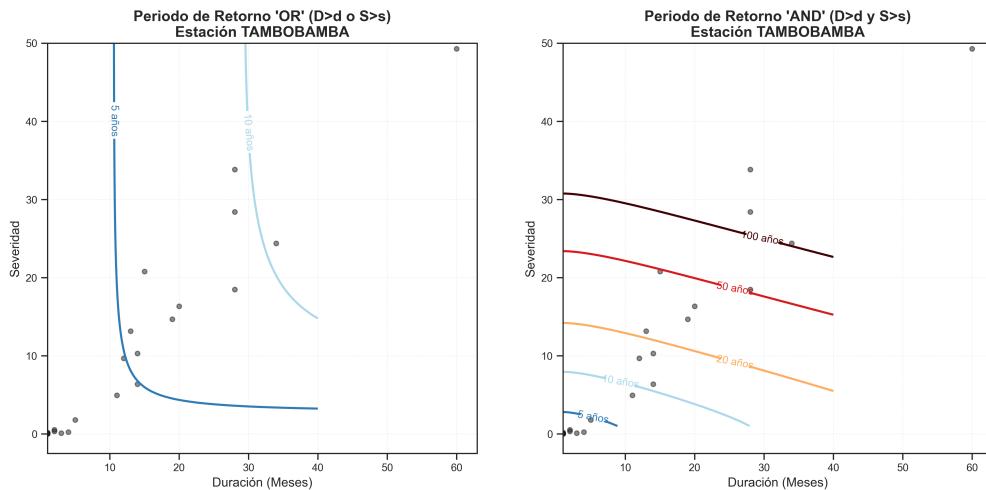


Figura C.27: Periodos de retorno conjunto para la estación Tambobamba.

Curvas de Periodo de Retorno Conjunto: UBINAS

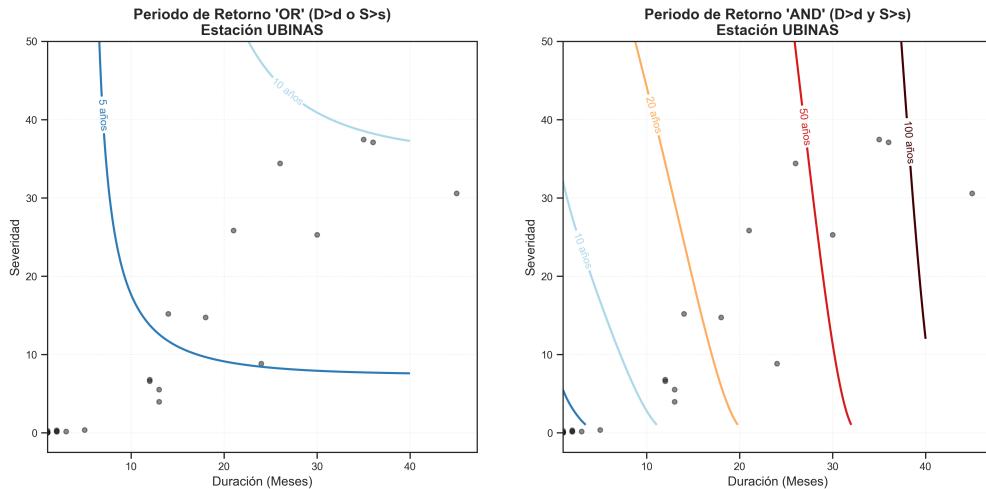


Figura C.28: Periodos de retorno conjunto para la estación Ubinas.

Capítulo D

Gráficos de Probabilidad Condicional

En este anexo se presentan las curvas de probabilidad condicional derivadas de las cónulas ajustadas. Estas gráficas muestran la probabilidad de que la severidad exceda un cierto umbral dado que la duración ha alcanzado un valor específico.

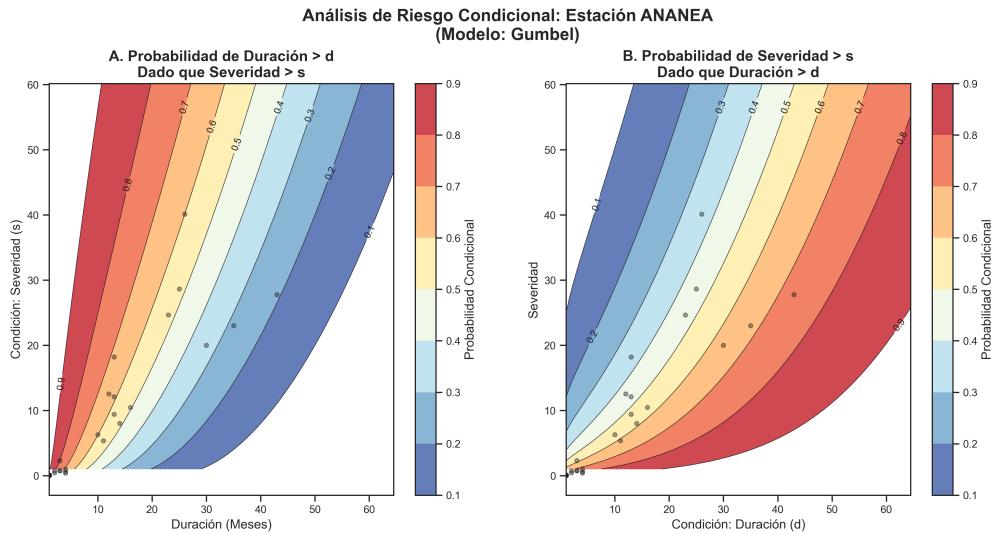


Figura D.1: Probabilidad condicional para la estación Ananea.

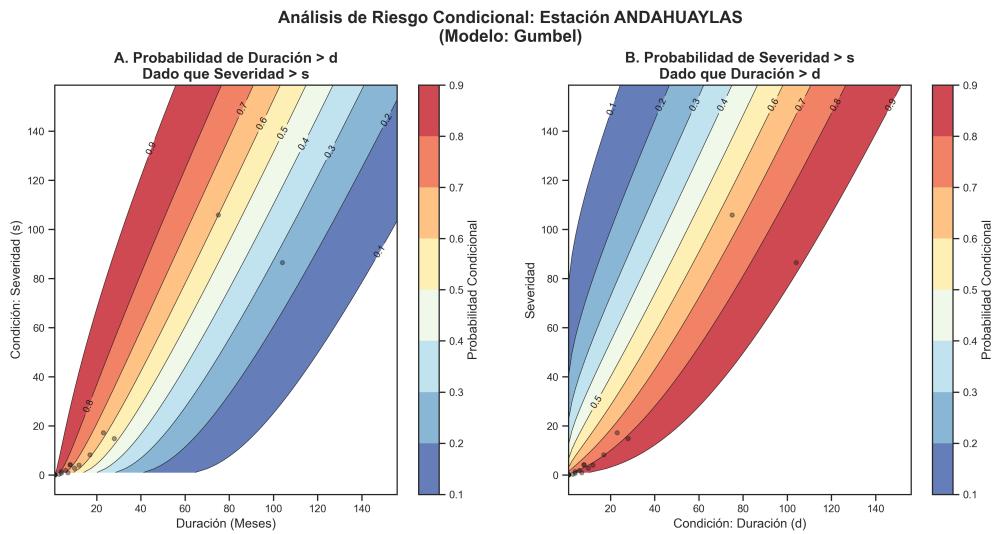


Figura D.2: Probabilidad condicional para la estación Andahuaylas.

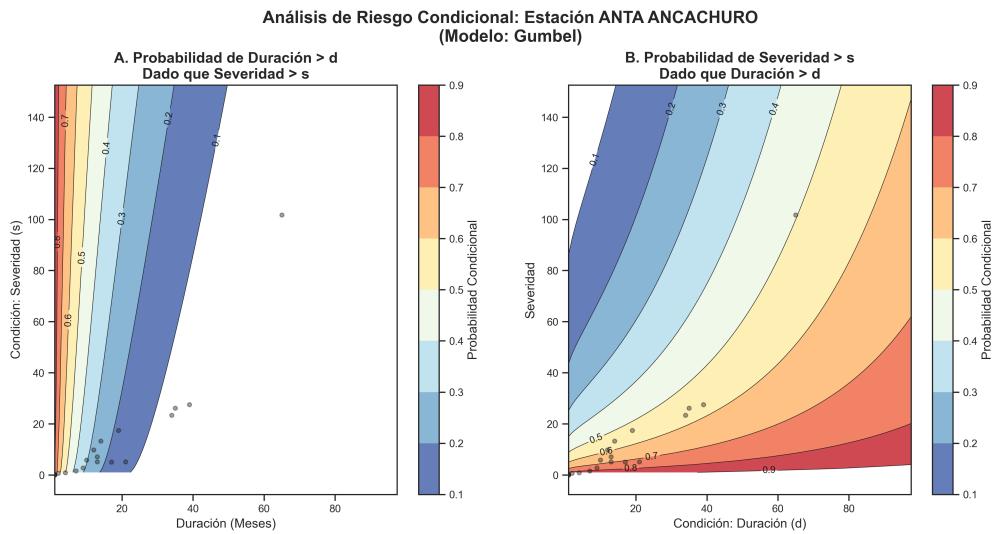


Figura D.3: Probabilidad condicional para la estación Anta Ancachuro.

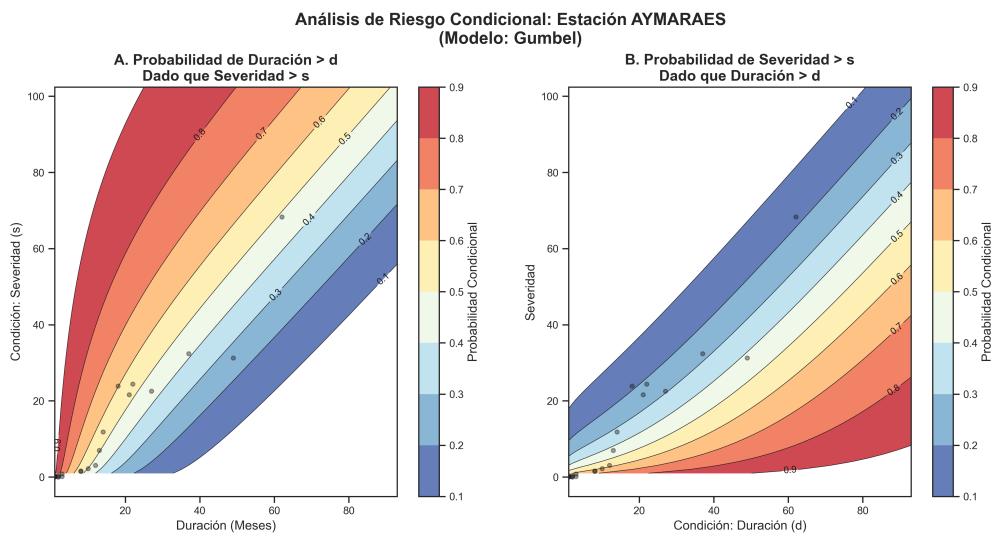


Figura D.4: Probabilidad condicional para la estación Aymaraes.

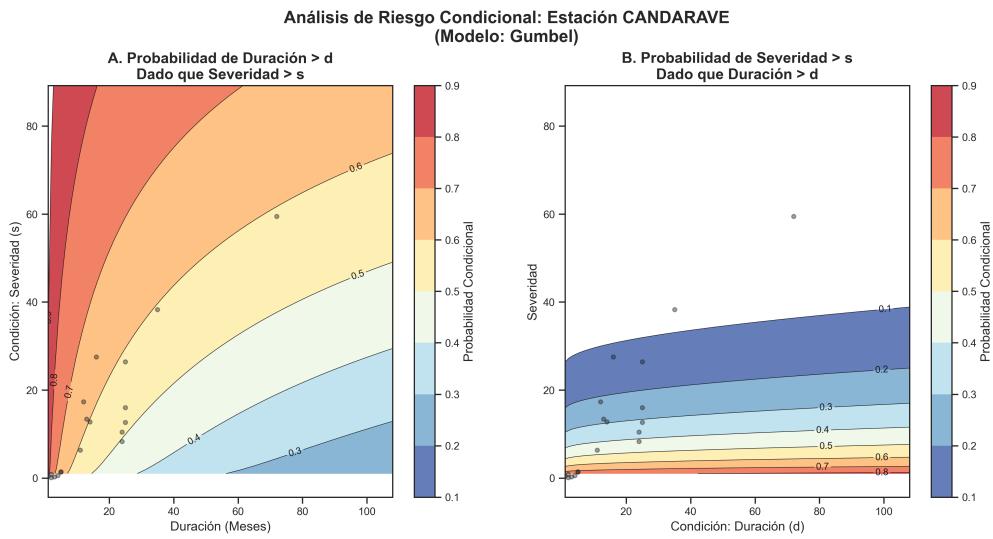


Figura D.5: Probabilidad condicional para la estación Candarave.

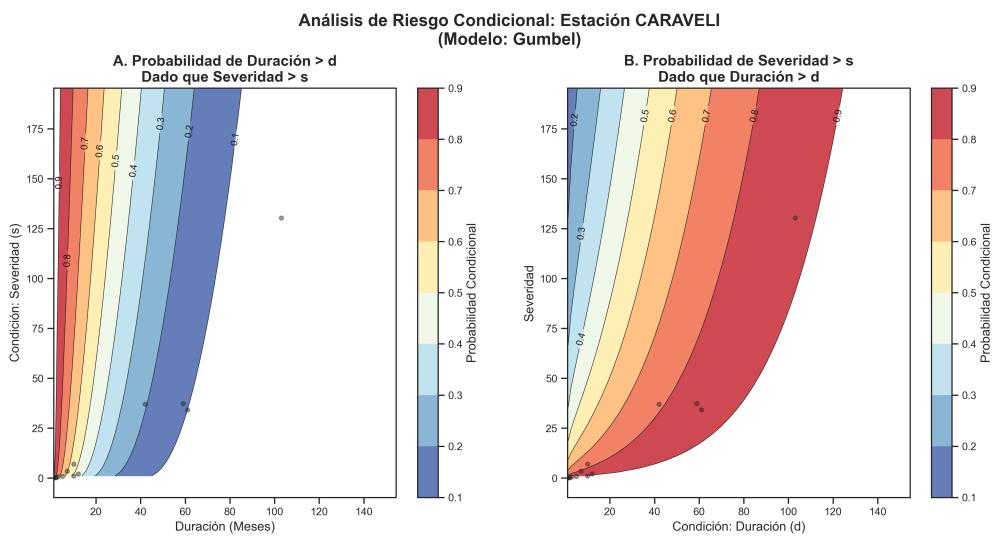


Figura D.6: Probabilidad condicional para la estación Caravelí.

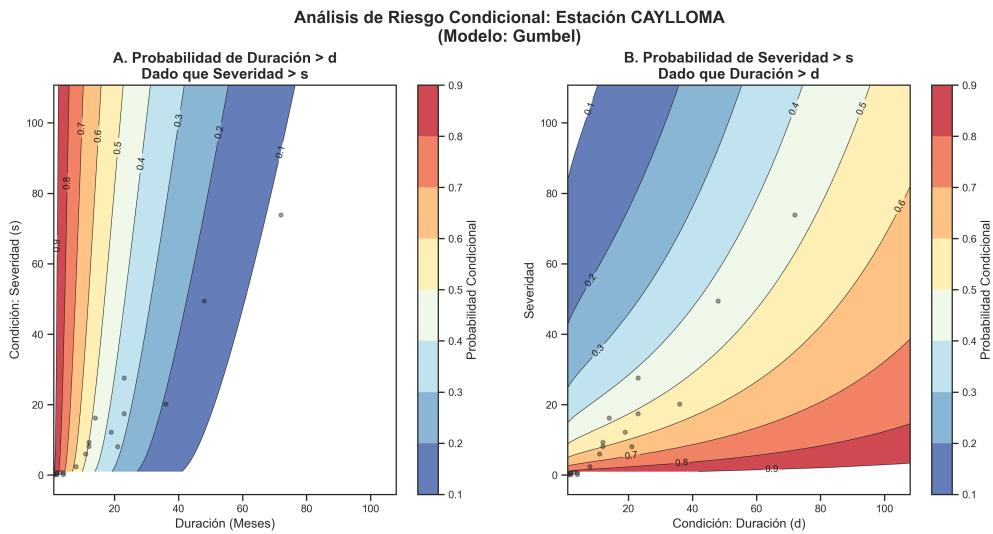


Figura D.7: Probabilidad condicional para la estación Caylloma.

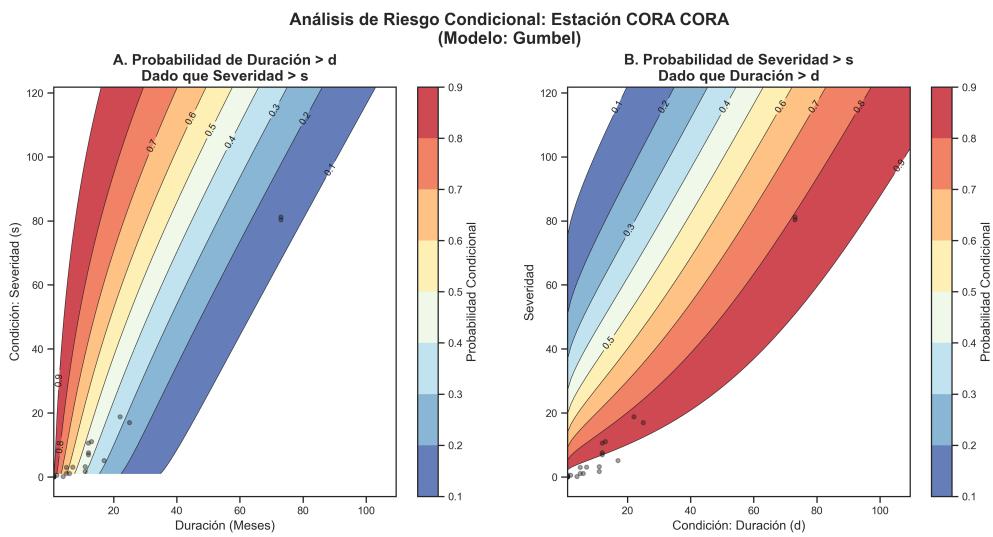


Figura D.8: Probabilidad condicional para la estación Cora Cora.

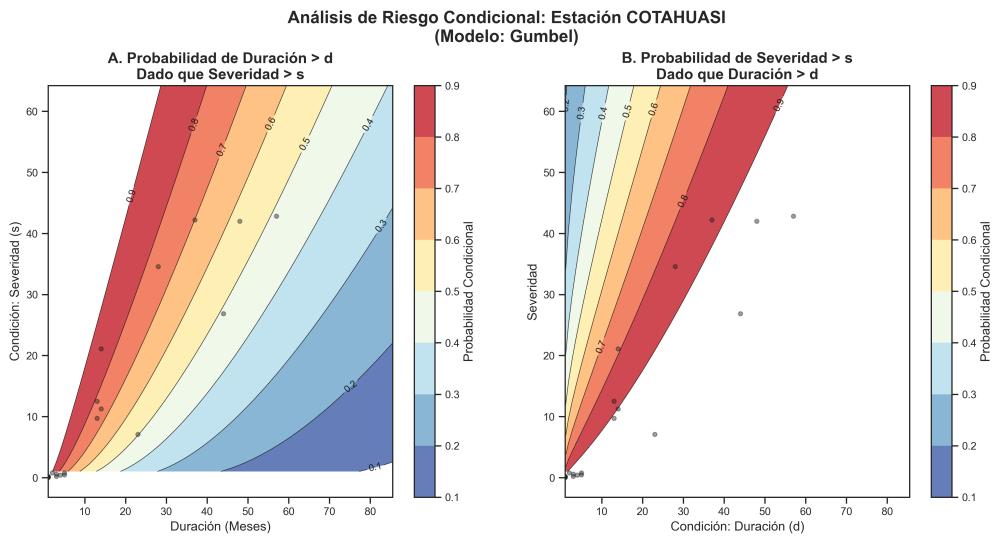


Figura D.9: Probabilidad condicional para la estación Cotahuasi.

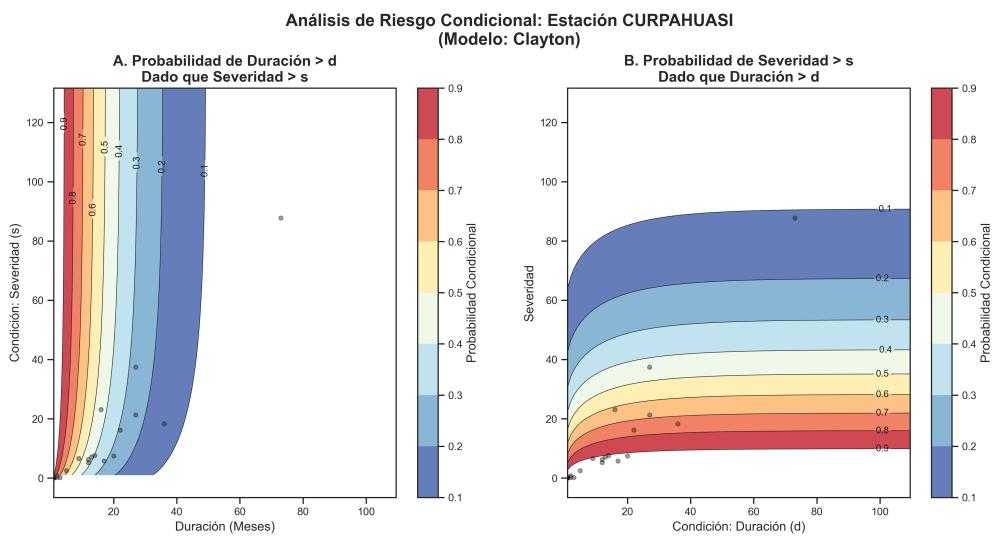


Figura D.10: Probabilidad condicional para la estación Curpahuasi.

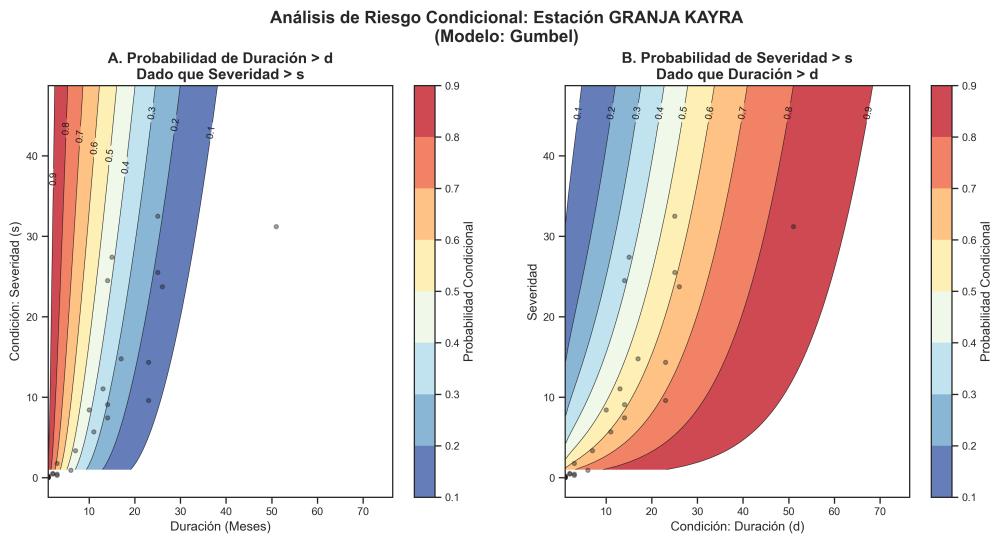


Figura D.11: Probabilidad condicional para la estación Granja Kayra.

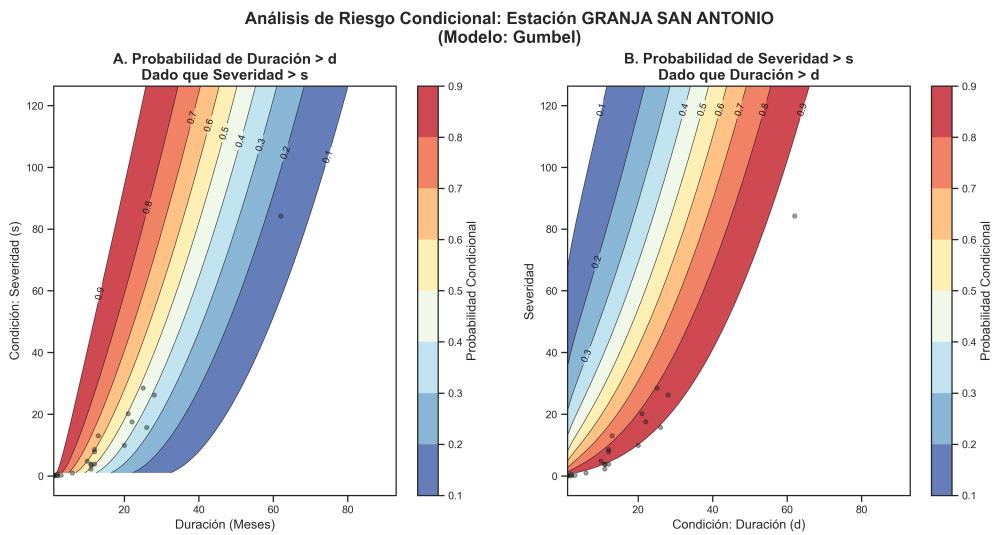


Figura D.12: Probabilidad condicional para la estación Granja San Antonio.

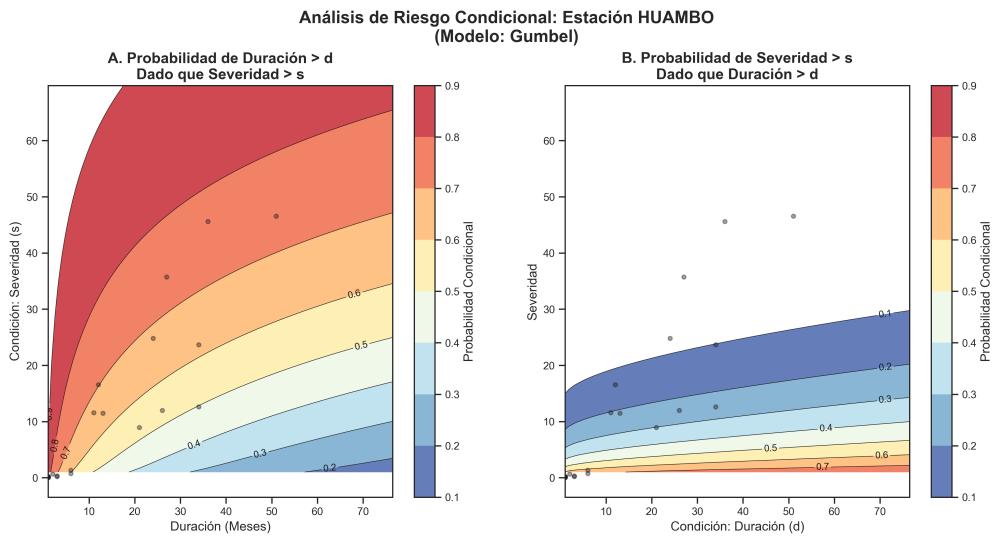


Figura D.13: Probabilidad condicional para la estación Huambo.

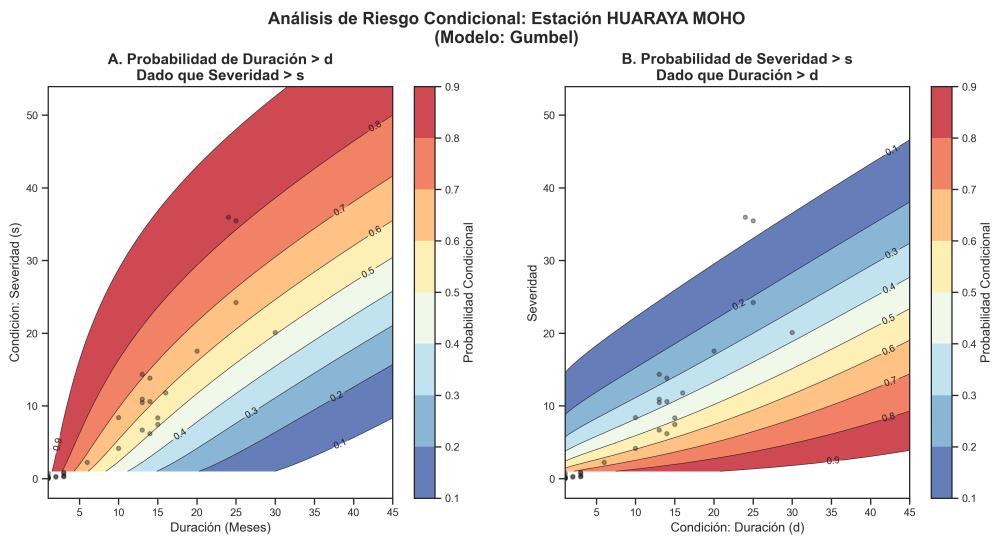


Figura D.14: Probabilidad condicional para la estación Huaraya Moho.

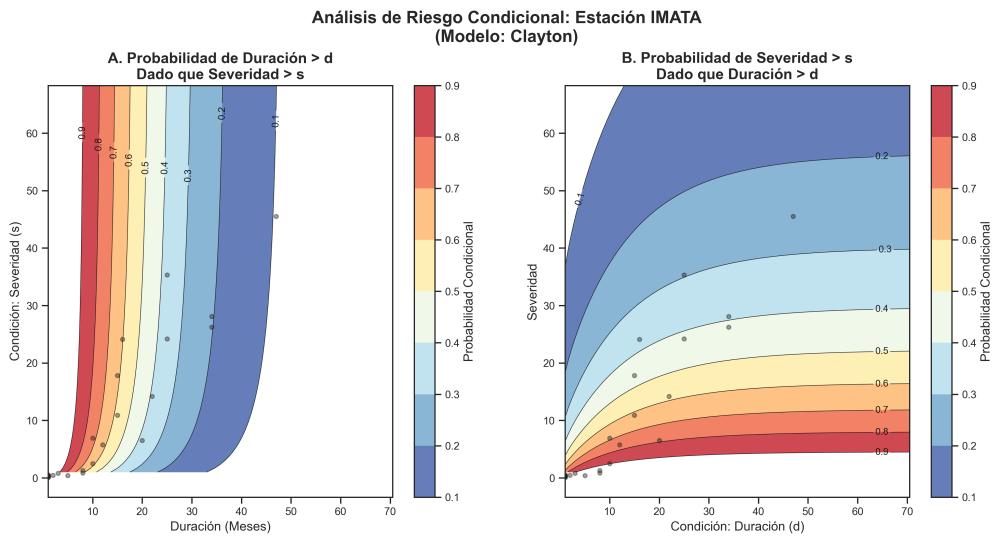


Figura D.15: Probabilidad condicional para la estación Imata.

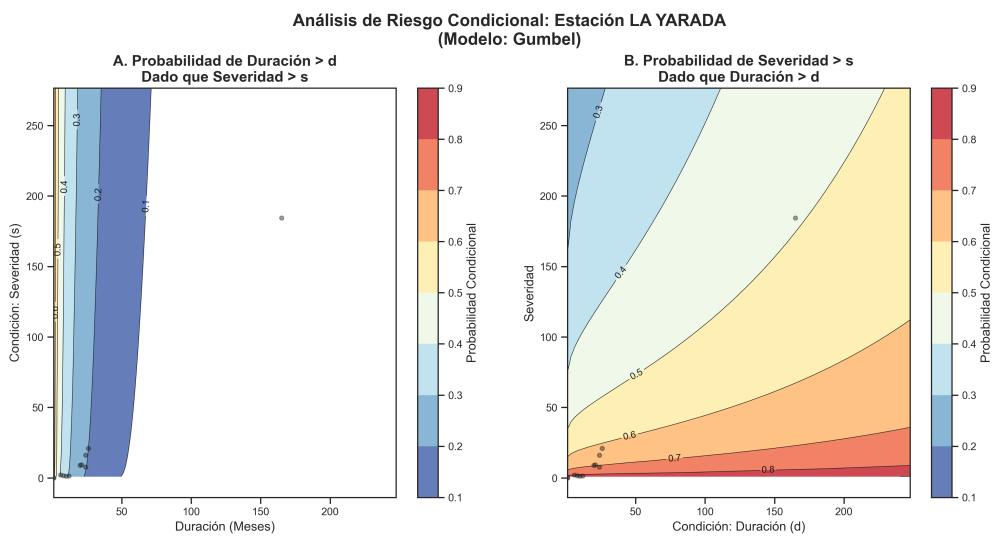


Figura D.16: Probabilidad condicional para la estación La Yarada.

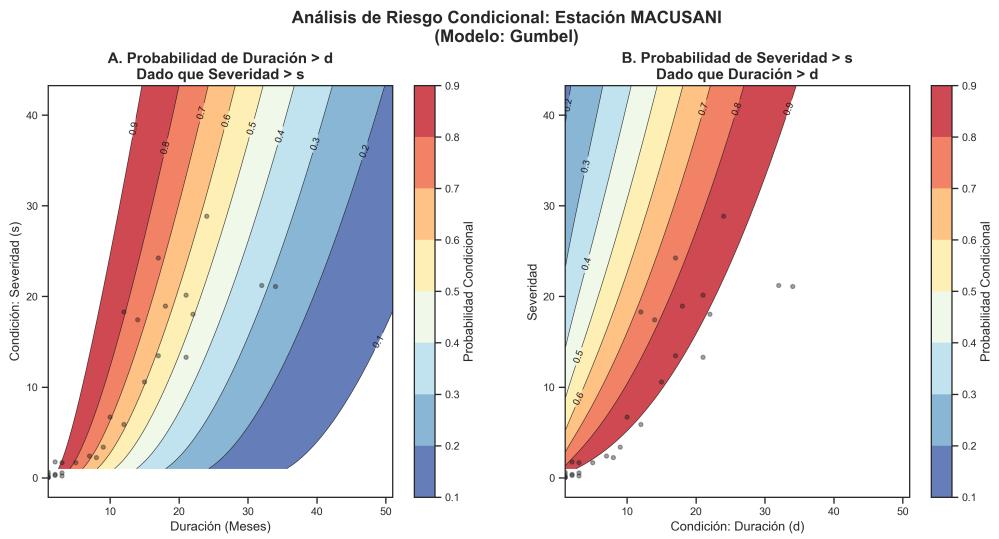


Figura D.17: Probabilidad condicional para la estación Macusani.

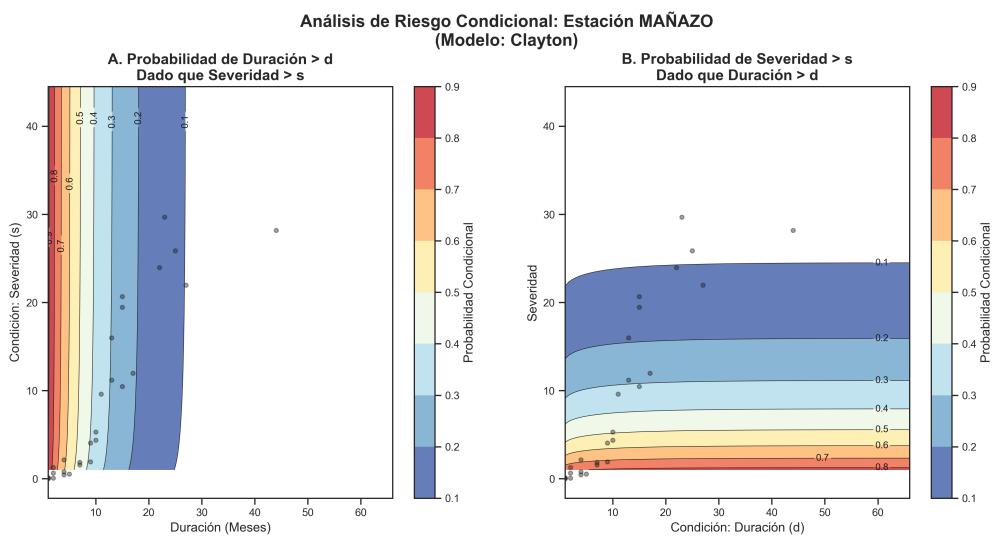


Figura D.18: Probabilidad condicional para la estación Mañazo.

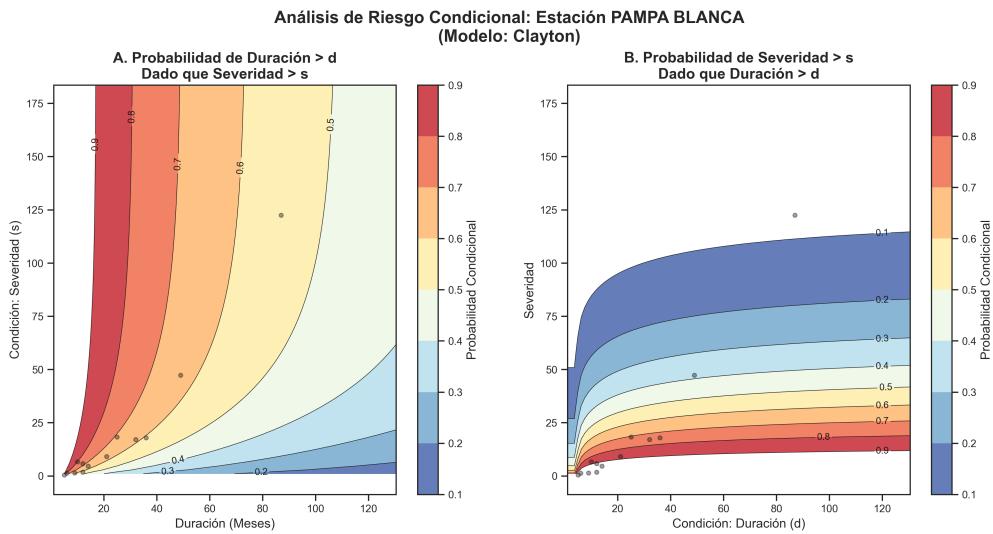


Figura D.19: Probabilidad condicional para la estación Pampa Blanca.

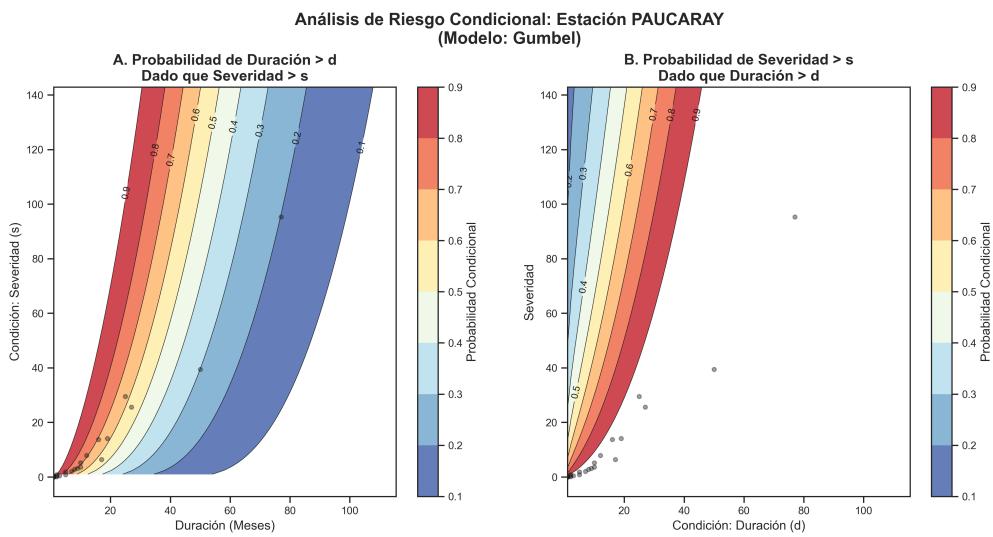


Figura D.20: Probabilidad condicional para la estación Paucaray.

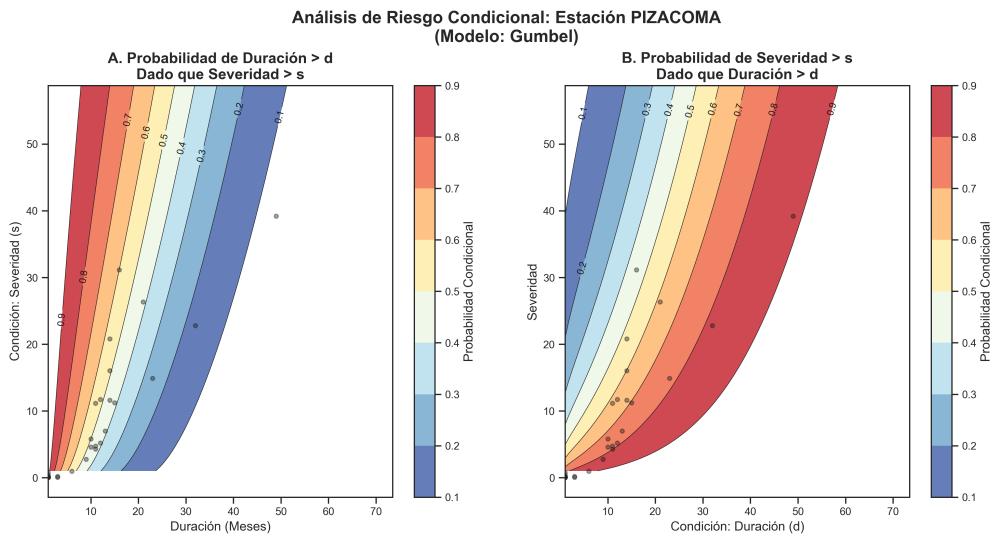


Figura D.21: Probabilidad condicional para la estación Pizacoma.

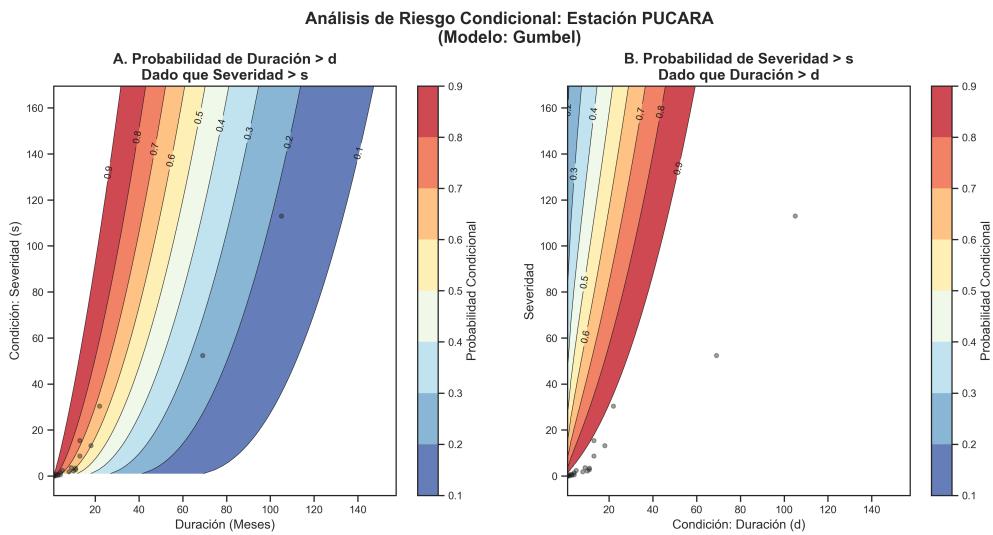


Figura D.22: Probabilidad condicional para la estación Pucará.

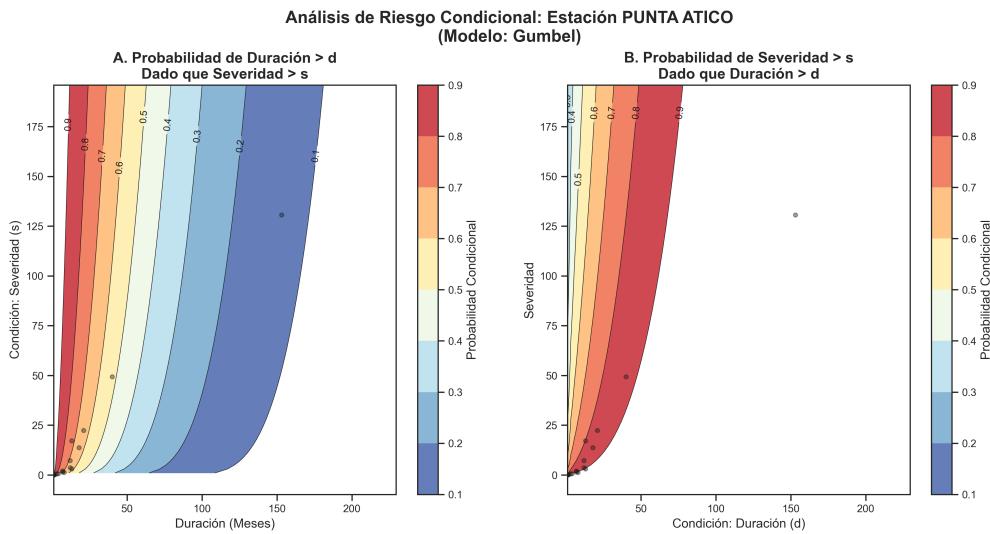


Figura D.23: Probabilidad condicional para la estación Punta Atico.

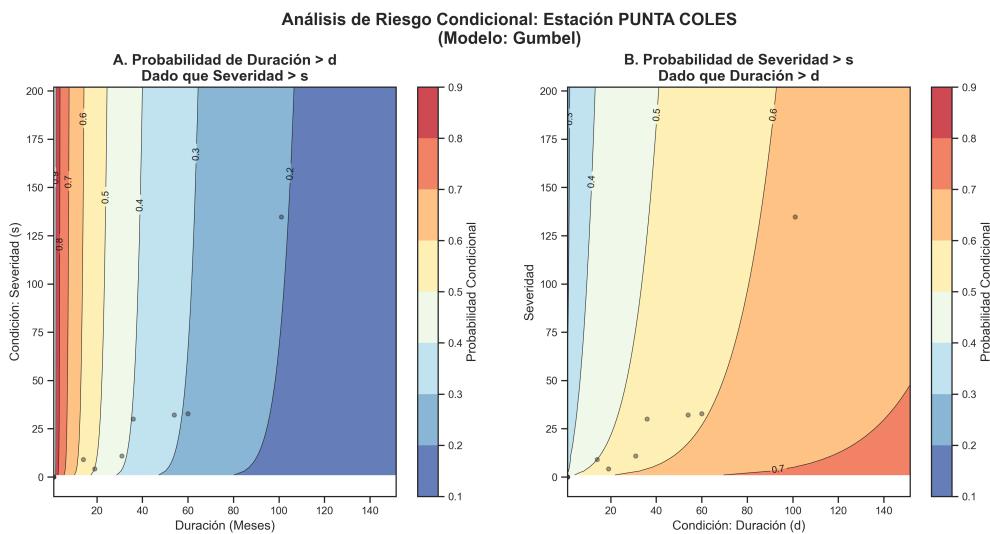


Figura D.24: Probabilidad condicional para la estación Punta Coles.

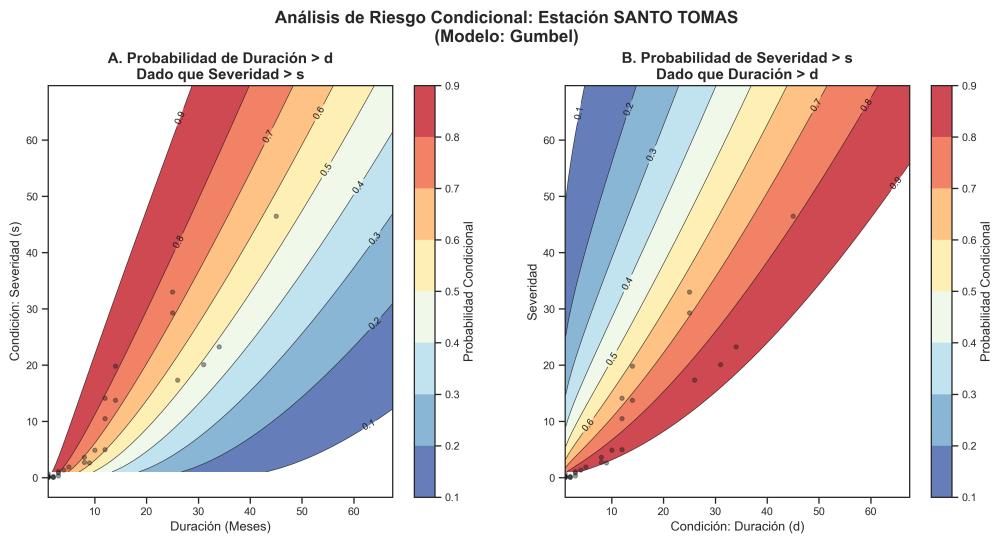


Figura D.25: Probabilidad condicional para la estación Santo Tomás.

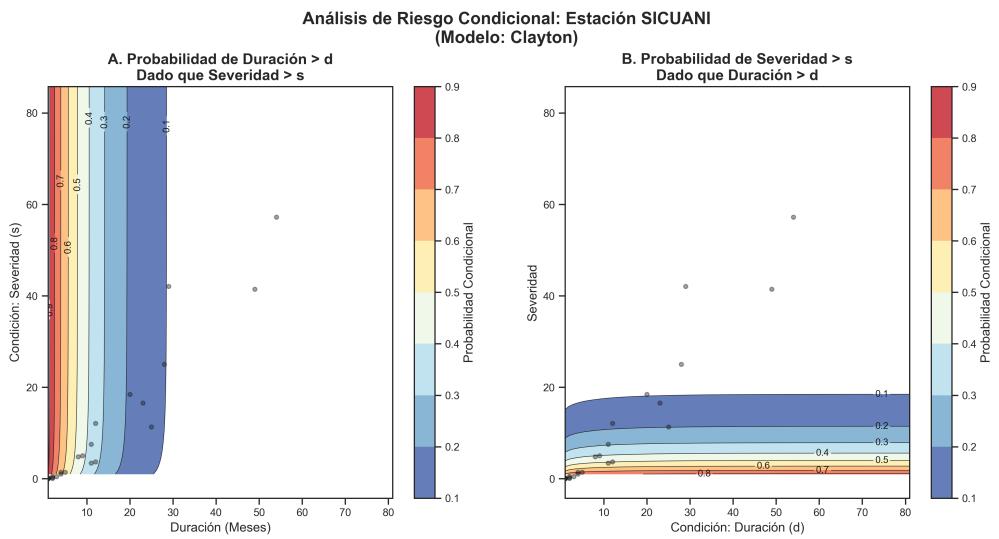


Figura D.26: Probabilidad condicional para la estación Sicuani.

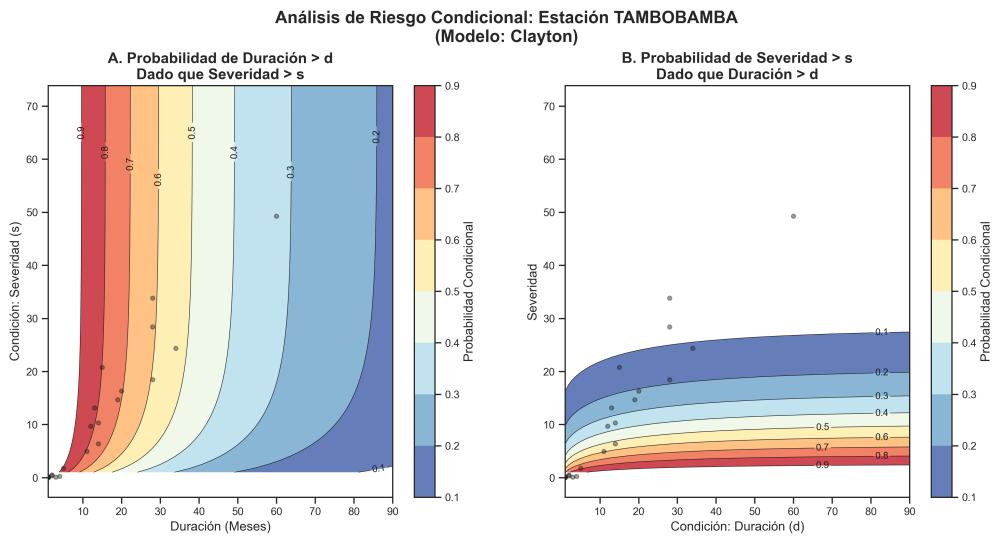


Figura D.27: Probabilidad condicional para la estación Tambobamba.

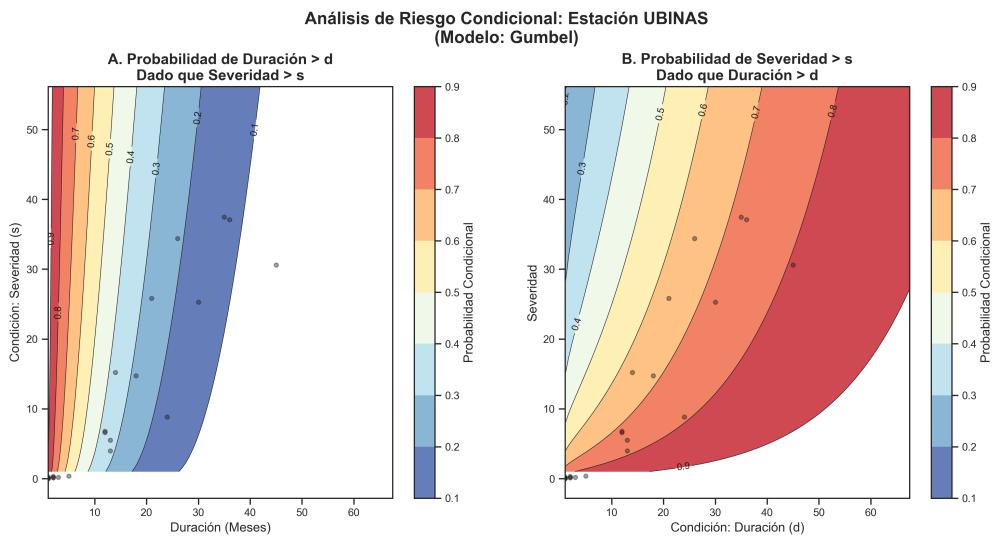


Figura D.28: Probabilidad condicional para la estación Ubinas.

Capítulo E

Tablas de Predicción de Riesgo de Sequía

En este anexo se detallan los escenarios de riesgo simulados mediante el método de Monte Carlo. Para cada estación, se evalúa la severidad esperada y máxima (percentil 95%) condicionada a que la duración de la sequía supere ciertos umbrales críticos (3, 6, 9, 12, 18 y 24 meses).

Tabla E.1: Predicción condicional de riesgo de sequía basada en simulación Monte Carlo (10,000 escenarios) para las 28 estaciones.

Estación	Escenario	Sev. Esperada	Sev. Máx. (95 %)	Prob. ($S > 10$)
ANANEA	≥ 3 meses	13.96	54.93	31.9%
	≥ 6 meses	18.77	66.86	44.4%
	≥ 9 meses	23.82	80.91	57.7%
	≥ 12 meses	29.25	94.76	70.2%
	≥ 18 meses	42.20	124.11	90.0%
	≥ 24 meses	55.17	148.63	96.5%
ANDAHUAYLAS	≥ 3 meses	34.84	141.13	57.2%
	≥ 6 meses	42.65	157.90	70.7%
	≥ 9 meses	49.51	168.35	81.7%
	≥ 12 meses	55.80	181.38	89.5%
	≥ 18 meses	67.91	203.60	97.1%
	≥ 24 meses	80.11	222.83	99.3%
ANTA ANCACHURO	≥ 3 meses	53.54	191.45	80.0%
	≥ 6 meses	71.85	233.83	95.5%
	≥ 9 meses	89.93	280.44	99.0%
	≥ 12 meses	108.96	314.83	99.9%
	≥ 18 meses	153.15	391.98	100.0%
	≥ 24 meses	192.69	468.53	100.0%
AYMARAES	≥ 3 meses	8.50	32.51	25.5%
	≥ 6 meses	11.14	37.52	34.3%
	≥ 9 meses	13.79	41.36	44.6%
	≥ 12 meses	16.40	46.35	56.3%
	≥ 18 meses	22.29	53.48	81.9%
	≥ 24 meses	28.63	62.03	96.1%
CANDARAVE	≥ 3 meses	13.18	43.05	42.8%

Continúa en la siguiente página...

Tabla E.1 – continuación de la página anterior

Estación	Escenario	Sev. Esperada	Sev. Máx. (95%)	Prob. ($S > 10$)
	≥ 6 meses	14.79	45.43	49.1%
	≥ 9 meses	15.85	47.41	53.5%
	≥ 12 meses	16.77	48.52	56.9%
	≥ 18 meses	18.21	49.94	62.6%
	≥ 24 meses	19.47	52.57	67.3%
CARAVELI	≥ 3 meses	164.25	687.25	78.7%
	≥ 6 meses	205.78	824.23	92.6%
	≥ 9 meses	245.94	953.82	98.1%
	≥ 12 meses	286.05	1060.39	99.7%
	≥ 18 meses	372.84	1330.13	100.0%
	≥ 24 meses	469.21	1559.20	100.0%
CAYLLOMA	≥ 3 meses	41.21	160.69	61.8%
	≥ 6 meses	50.17	183.39	75.8%
	≥ 9 meses	59.23	206.72	87.6%
	≥ 12 meses	68.76	222.96	95.0%
	≥ 18 meses	88.14	272.03	99.4%
	≥ 24 meses	110.70	317.05	100.0%
CORA CORA	≥ 3 meses	40.25	111.78	88.8%
	≥ 6 meses	48.33	121.69	97.3%
	≥ 9 meses	55.26	129.07	99.4%
	≥ 12 meses	61.85	138.15	99.8%
	≥ 18 meses	73.89	154.20	100.0%
	≥ 24 meses	86.03	167.97	100.0%
COTAHUASI	≥ 3 meses	64.37	264.43	67.6%
	≥ 6 meses	79.26	304.56	81.6%
	≥ 9 meses	91.94	334.25	89.8%
	≥ 12 meses	103.39	362.44	94.8%
	≥ 18 meses	124.76	420.40	98.3%
	≥ 24 meses	145.83	479.13	99.5%
CURPAHUASI	≥ 3 meses	34.23	97.08	84.3%
	≥ 6 meses	41.69	106.66	95.7%
	≥ 9 meses	48.19	115.42	99.1%
	≥ 12 meses	53.89	123.70	99.7%
	≥ 18 meses	65.40	137.01	100.0%
	≥ 24 meses	77.65	151.59	100.0%
GRANJA KAYRA	≥ 3 meses	19.99	79.41	40.8%
	≥ 6 meses	29.54	105.65	60.6%
	≥ 9 meses	40.06	134.57	76.0%
	≥ 12 meses	52.98	167.88	88.1%
	≥ 18 meses	80.99	223.04	97.2%
	≥ 24 meses	117.45	323.55	100.0%
GRANJA SAN ANTONIO	≥ 3 meses	33.55	127.55	59.3%
	≥ 6 meses	43.05	151.37	76.8%
	≥ 9 meses	52.81	169.92	90.5%
	≥ 12 meses	62.91	192.69	96.8%

Continúa en la siguiente página...

Tabla E.1 – continuación de la página anterior

Estación	Escenario	Sev. Esperada	Sev. Máx. (95 %)	Prob. ($S > 10$)
	≥ 18 meses	85.35	241.58	99.8%
	≥ 24 meses	112.73	282.47	100.0%
HUAMBO	≥ 3 meses	7.52	25.78	23.3%
	≥ 6 meses	8.87	28.13	28.3%
	≥ 9 meses	9.96	29.38	32.8%
	≥ 12 meses	10.86	30.65	36.8%
	≥ 18 meses	12.39	33.22	44.5%
	≥ 24 meses	13.72	35.90	51.7%
HUARAYA MOHO	≥ 3 meses	7.22	23.82	22.6%
	≥ 6 meses	9.39	27.03	31.5%
	≥ 9 meses	11.43	30.04	41.7%
	≥ 12 meses	13.37	33.71	52.4%
	≥ 18 meses	17.39	38.96	73.4%
	≥ 24 meses	21.55	43.85	88.1%
IMATA	≥ 3 meses	19.02	75.18	41.1%
	≥ 6 meses	24.88	91.58	55.2%
	≥ 9 meses	30.91	104.54	70.4%
	≥ 12 meses	37.25	121.36	84.5%
	≥ 18 meses	52.36	151.92	98.3%
	≥ 24 meses	70.29	182.17	100.0%
LA YARADA	≥ 3 meses	848.36	3426.63	97.3%
	≥ 6 meses	1034.54	4044.21	99.3%
	≥ 9 meses	1195.13	4643.28	99.7%
	≥ 12 meses	1338.87	5293.65	99.8%
	≥ 18 meses	1622.58	6017.21	100.0%
	≥ 24 meses	1883.13	6789.58	100.0%
MACUSANI	≥ 3 meses	36.21	141.53	59.1%
	≥ 6 meses	45.77	164.27	74.9%
	≥ 9 meses	55.82	185.72	87.3%
	≥ 12 meses	66.04	211.05	94.6%
	≥ 18 meses	88.60	258.97	99.2%
	≥ 24 meses	114.89	307.31	100.0%
MAÑAZO	≥ 3 meses	12.06	36.49	41.4%
	≥ 6 meses	15.56	41.27	57.9%
	≥ 9 meses	18.70	45.28	74.7%
	≥ 12 meses	21.88	49.93	88.5%
	≥ 18 meses	28.48	57.33	99.5%
	≥ 24 meses	34.26	64.34	99.9%
PAMPA BLANCA	≥ 3 meses	17.88	79.24	37.7%
	≥ 6 meses	31.07	105.86	67.6%
	≥ 9 meses	38.20	117.80	83.5%
	≥ 12 meses	42.53	124.81	90.6%
	≥ 18 meses	48.90	135.73	96.2%
	≥ 24 meses	53.89	143.78	98.5%

Continúa en la siguiente página...

Tabla E.1 – continuación de la página anterior

Estación	Escenario	Sev. Esperada	Sev. Máx. (95%)	Prob. ($S > 10$)
PAUCARAY	≥ 3 meses	147.48	620.05	69.1%
	≥ 6 meses	182.46	742.45	81.6%
	≥ 9 meses	215.44	838.16	89.4%
	≥ 12 meses	248.51	963.14	93.6%
	≥ 18 meses	317.58	1235.99	97.7%
	≥ 24 meses	393.15	1423.22	99.4%
PIZACOMA	≥ 3 meses	20.75	76.11	49.5%
	≥ 6 meses	28.15	91.91	69.2%
	≥ 9 meses	35.93	108.84	85.1%
	≥ 12 meses	44.31	126.44	93.5%
	≥ 18 meses	65.10	164.65	99.8%
	≥ 24 meses	85.01	197.62	99.9%
PUCARA	≥ 3 meses	184.63	774.44	83.9%
	≥ 6 meses	222.45	908.90	94.2%
	≥ 9 meses	255.50	996.20	98.1%
	≥ 12 meses	285.41	1073.74	99.5%
	≥ 18 meses	344.69	1269.88	99.9%
	≥ 24 meses	409.16	1457.15	100.0%
PUNTA ATICO	≥ 3 meses	2906.48	8866.12	78.1%
	≥ 6 meses	3460.85	11072.29	90.0%
	≥ 9 meses	3915.48	13160.17	95.8%
	≥ 12 meses	4367.55	14253.38	98.5%
	≥ 18 meses	5177.73	18288.03	99.7%
	≥ 24 meses	6000.04	22380.96	100.0%
PUNTA COLES	≥ 3 meses	296749147357466048.00	1238071591.13	51.5%
	≥ 6 meses	363635803943465216.00	4118822931.97	63.1%
	≥ 9 meses	419661529060433216.00	12283425216.36	72.5%
	≥ 12 meses	473986966328572224.00	19936646181.86	80.5%
	≥ 18 meses	571073501193032640.00	68472524138.27	90.8%
	≥ 24 meses	666063195559799296.00	192977421333.55	95.8%
SANTO TOMAS	≥ 3 meses	25.80	100.16	51.0%
	≥ 6 meses	33.31	119.49	67.0%
	≥ 9 meses	40.33	135.16	79.3%
	≥ 12 meses	46.93	153.36	87.4%
	≥ 18 meses	60.62	182.37	95.9%
	≥ 24 meses	74.94	212.61	98.9%
SICUANI	≥ 3 meses	8.62	28.04	25.2%
	≥ 6 meses	11.28	32.60	35.5%
	≥ 9 meses	13.72	37.12	47.1%
	≥ 12 meses	16.38	41.74	62.2%
	≥ 18 meses	21.96	49.04	90.3%
	≥ 24 meses	27.20	58.20	98.1%
TAMBOBAMBA	≥ 3 meses	7.72	26.17	24.2%
	≥ 6 meses	9.32	28.82	30.1%

Continúa en la siguiente página...

Tabla E.1 – continuación de la página anterior

Estación	Escenario	Sev. Esperada	Sev. Máx. (95 %)	Prob. ($S > 10$)
UBINAS	≥ 9 meses	10.60	30.93	35.4 %
	≥ 12 meses	11.80	32.10	40.9 %
	≥ 18 meses	13.85	35.18	51.8 %
	≥ 24 meses	15.73	38.48	62.5 %
UBINAS	≥ 3 meses	74.17	306.05	68.1 %
	≥ 6 meses	100.81	382.53	85.7 %
	≥ 9 meses	129.06	459.78	94.4 %
	≥ 12 meses	159.81	560.38	97.8 %
	≥ 18 meses	235.16	736.39	99.7 %
	≥ 24 meses	316.09	920.09	100.0 %

Capítulo F

Gráficos de Predicción de Riesgo (Simulación vs. Histórico)

En este anexo se comparan los eventos históricos observados (puntos cian) con el espacio de riesgo simulado mediante 10,000 escenarios Monte Carlo (mapa de calor).

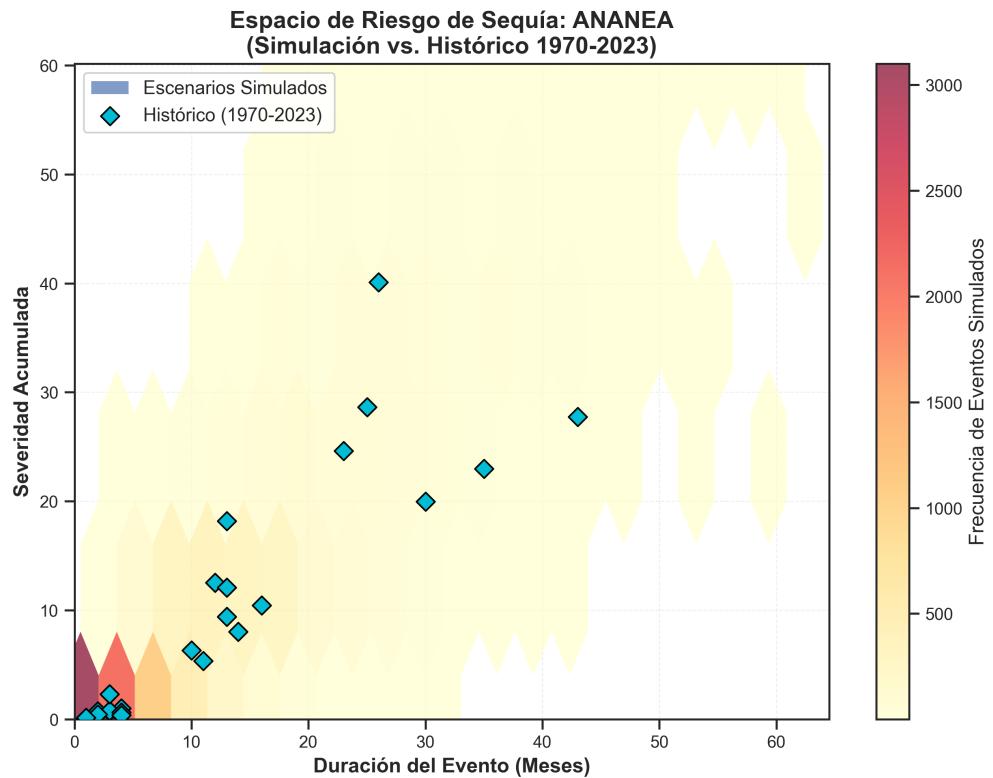


Figura F.1: Predicción de riesgo y probabilidad condicional para la estación Ananea.

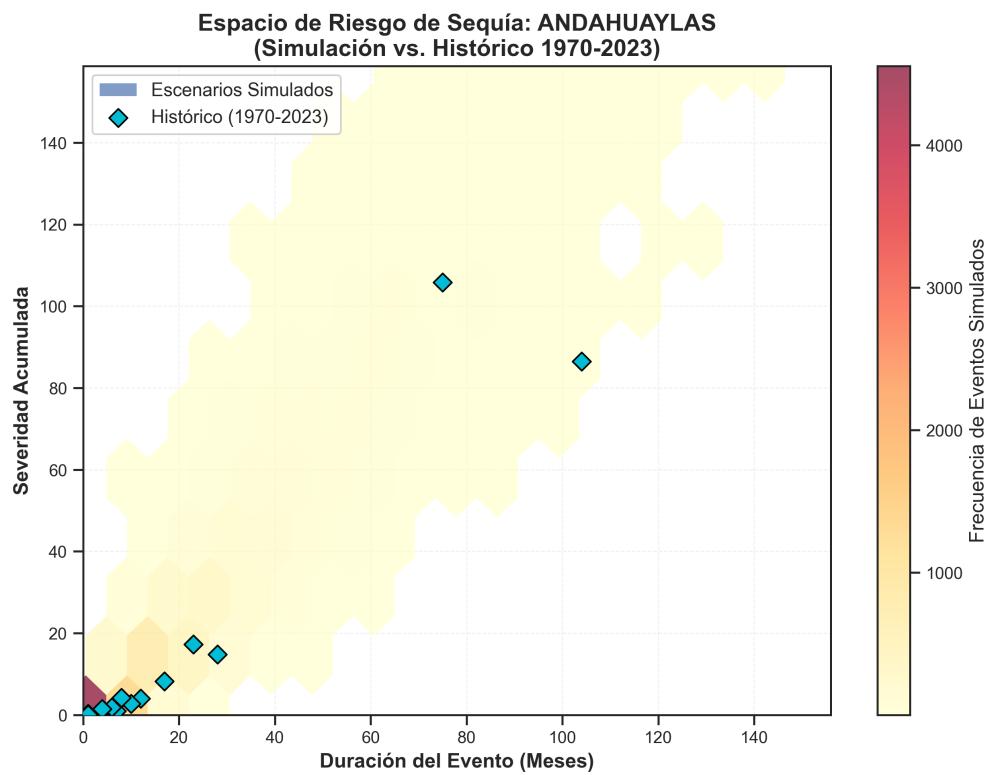


Figura F.2: Predicción de riesgo y probabilidad condicional para la estación Andahuaylas.

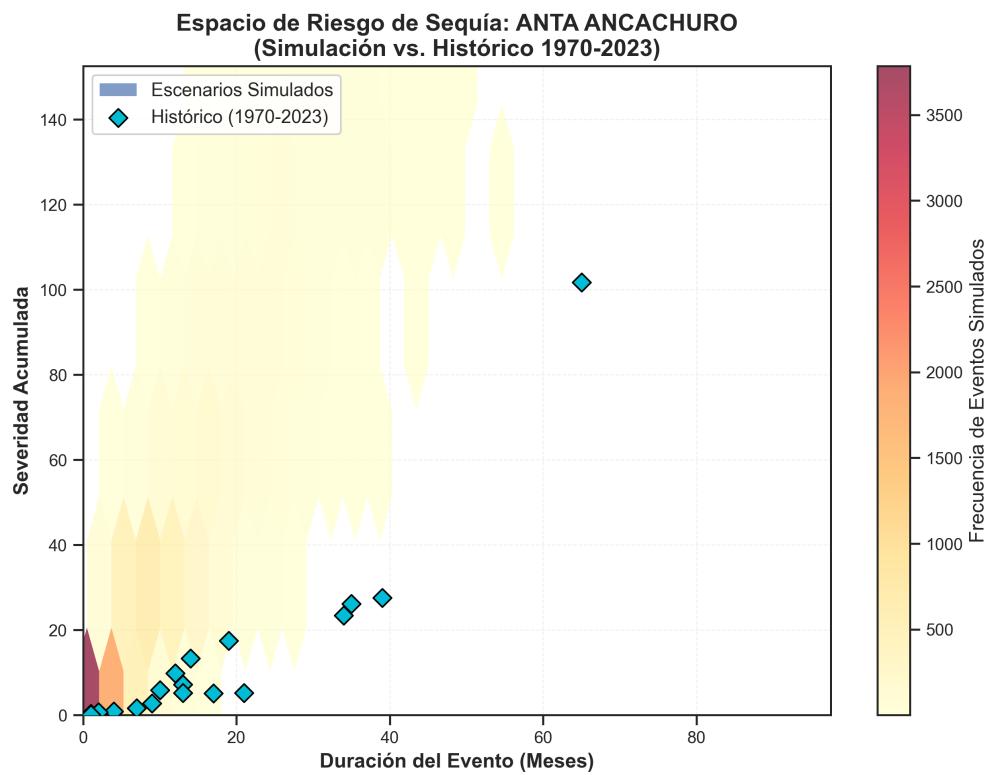


Figura F.3: Predicción de riesgo y probabilidad condicional para la estación Anta Ancachuro.

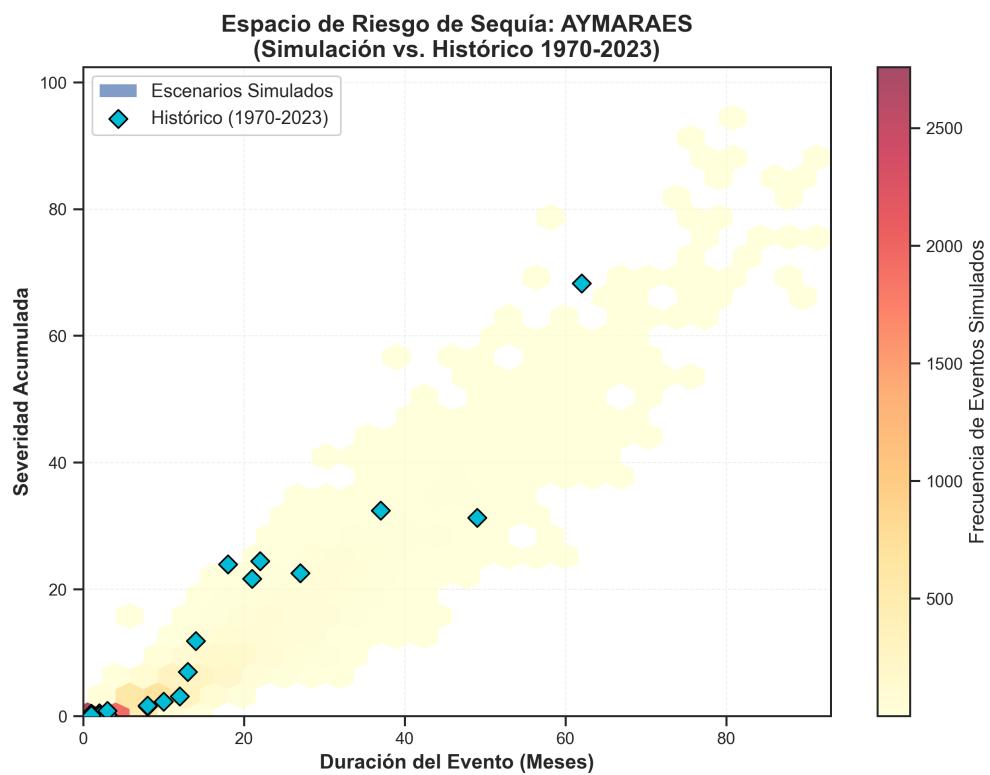


Figura F.4: Predicción de riesgo y probabilidad condicional para la estación Aymaraes.

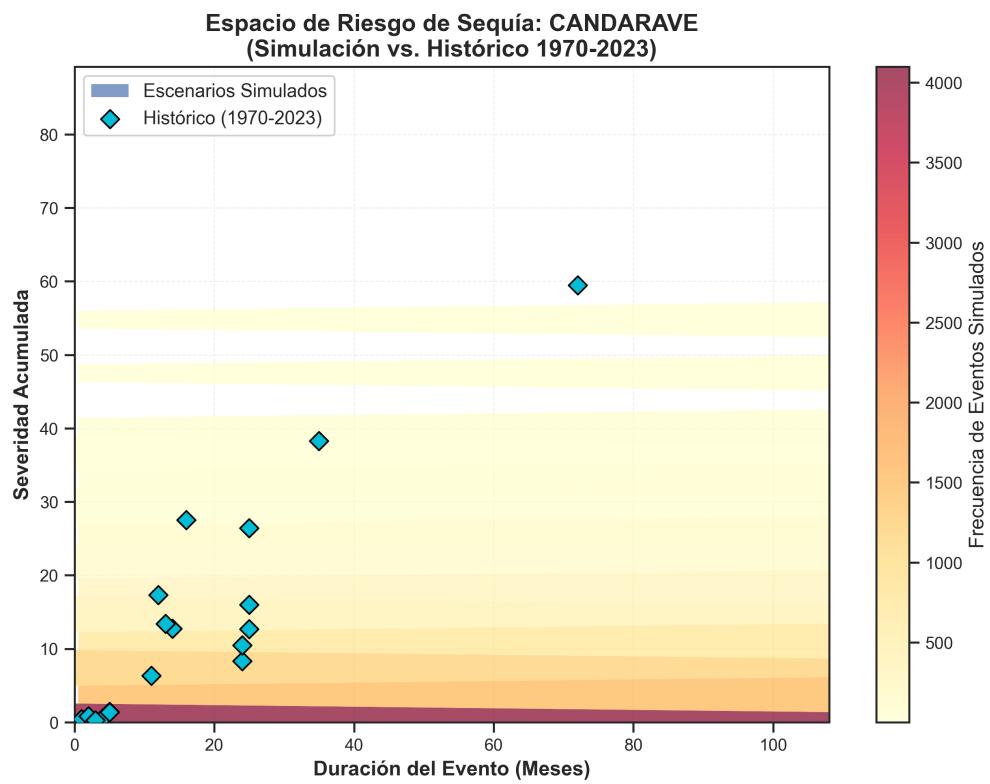


Figura F.5: Predicción de riesgo y probabilidad condicional para la estación Candarave.

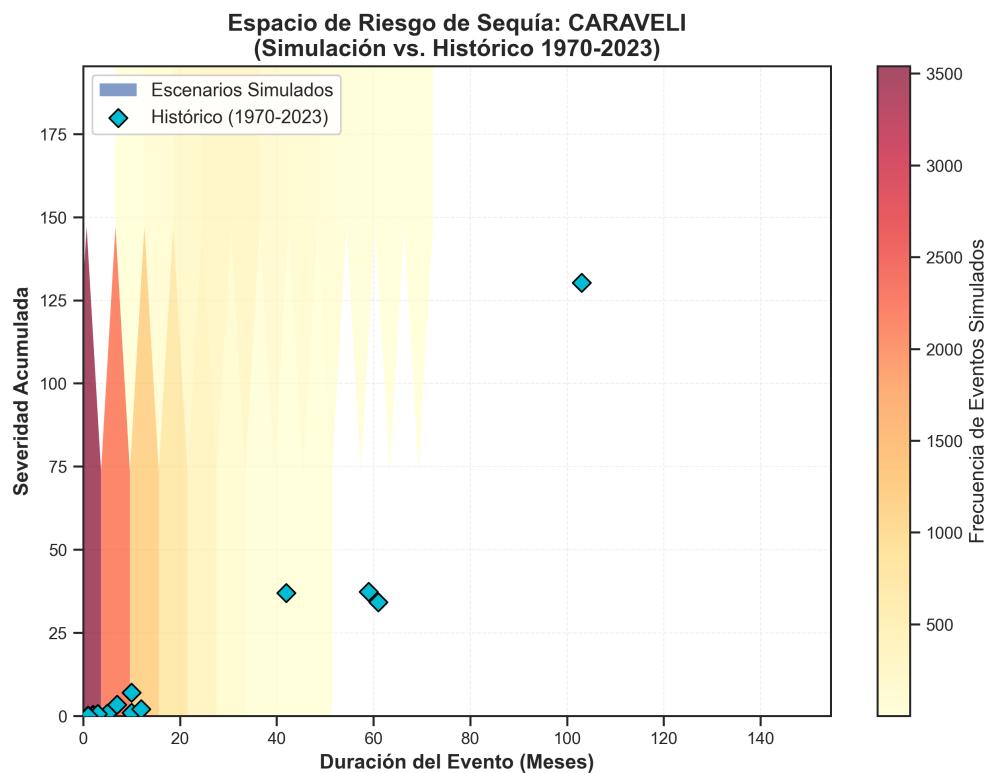


Figura F.6: Predicción de riesgo y probabilidad condicional para la estación Caravelí.

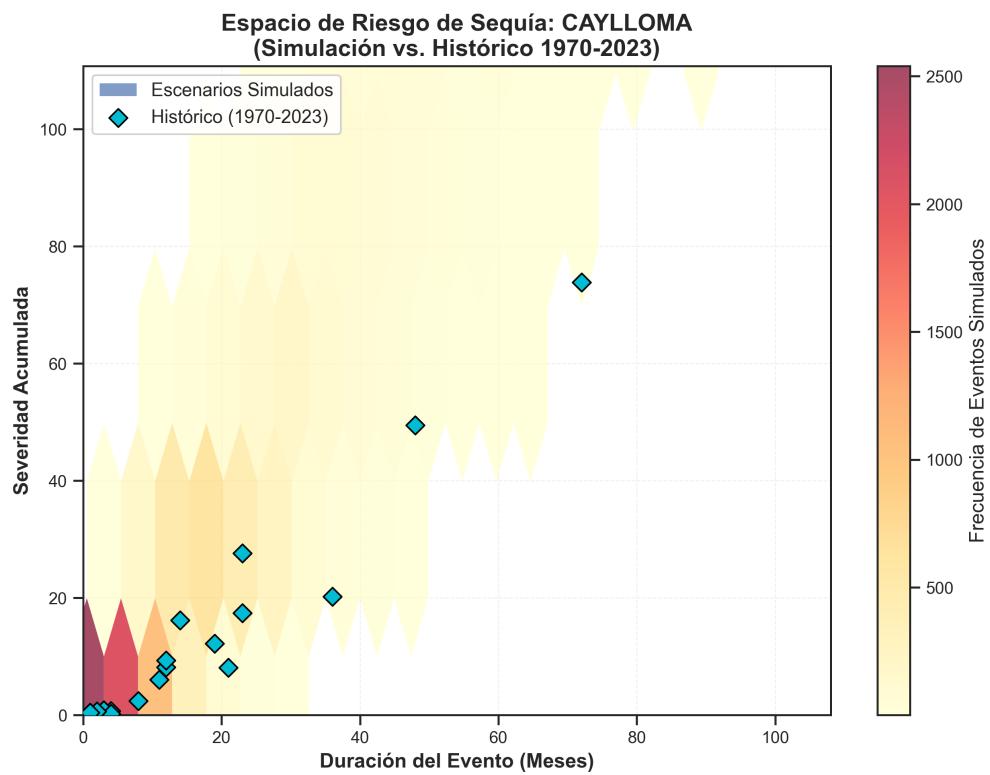


Figura F.7: Predicción de riesgo y probabilidad condicional para la estación Caylloma.

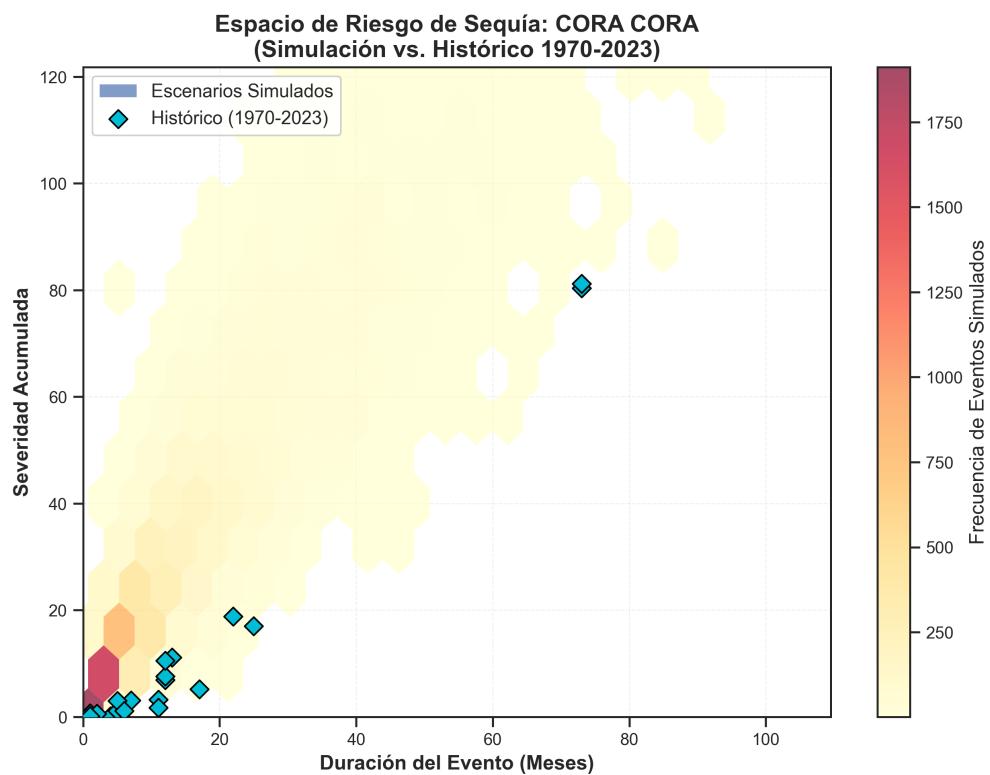


Figura F.8: Predicción de riesgo y probabilidad condicional para la estación Cora Cora.

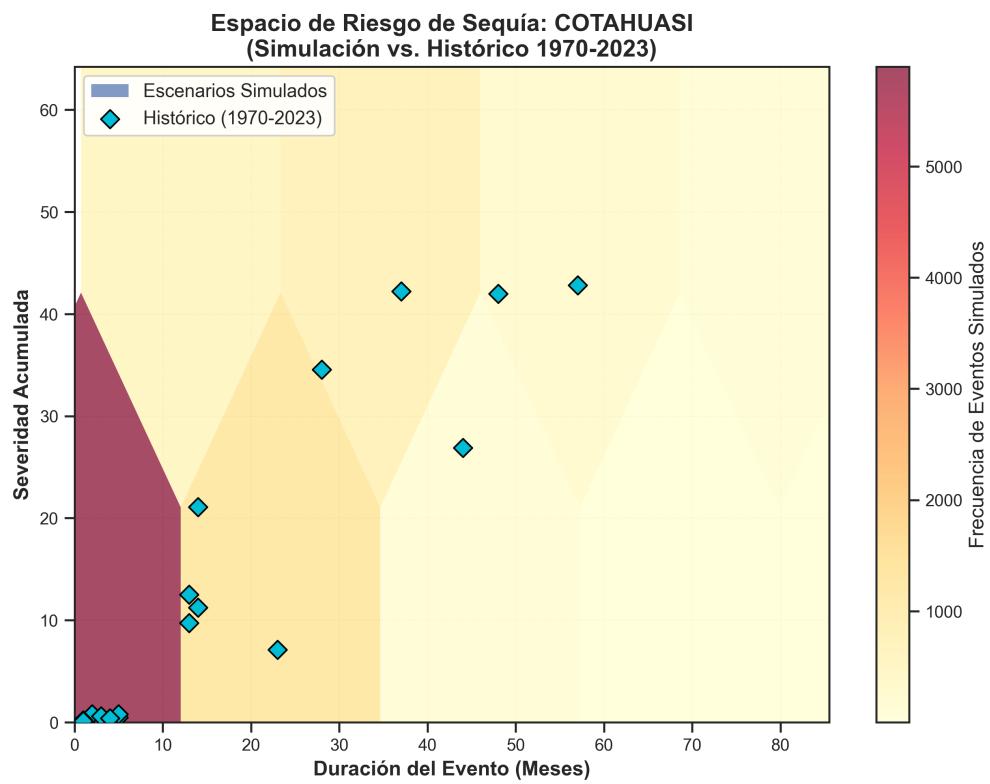


Figura F.9: Predicción de riesgo y probabilidad condicional para la estación Cotahuasi.

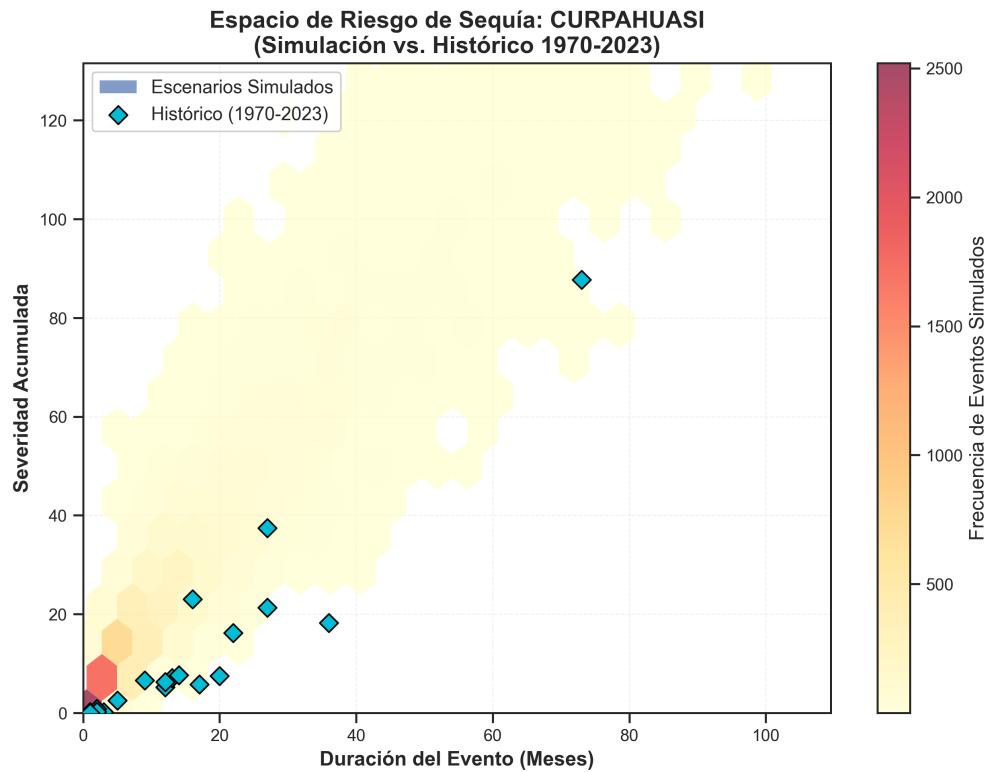


Figura F.10: Predicción de riesgo y probabilidad condicional para la estación Curpahuasi.

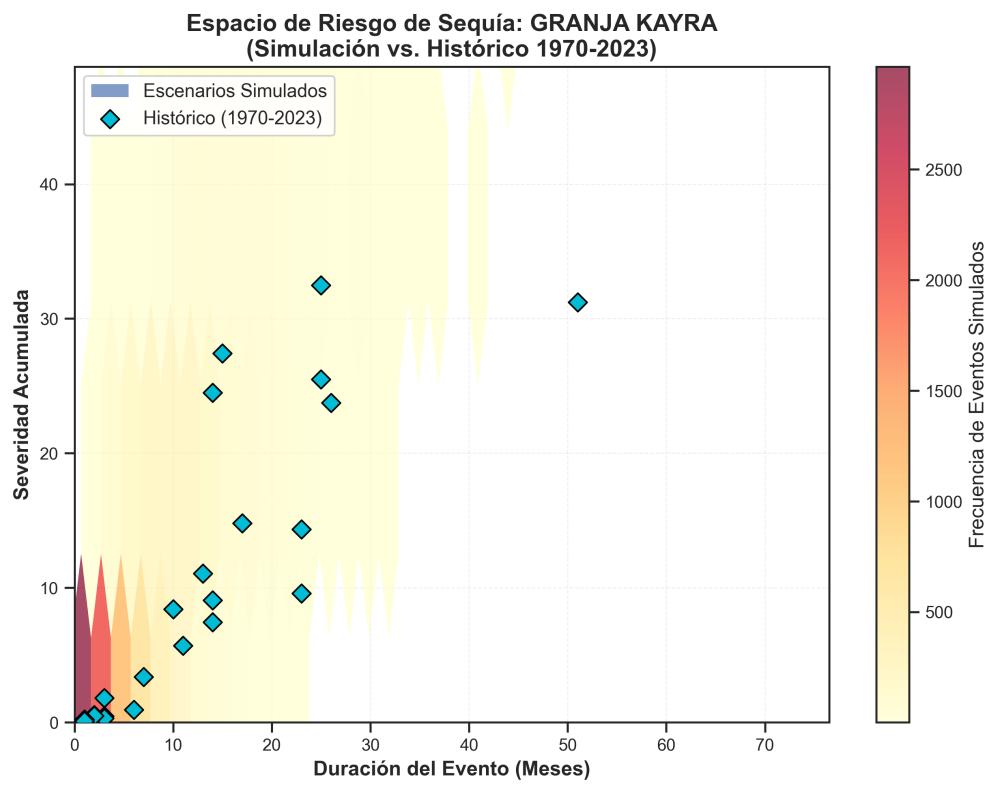


Figura F.11: Predicción de riesgo y probabilidad condicional para la estación Granja Kayra.

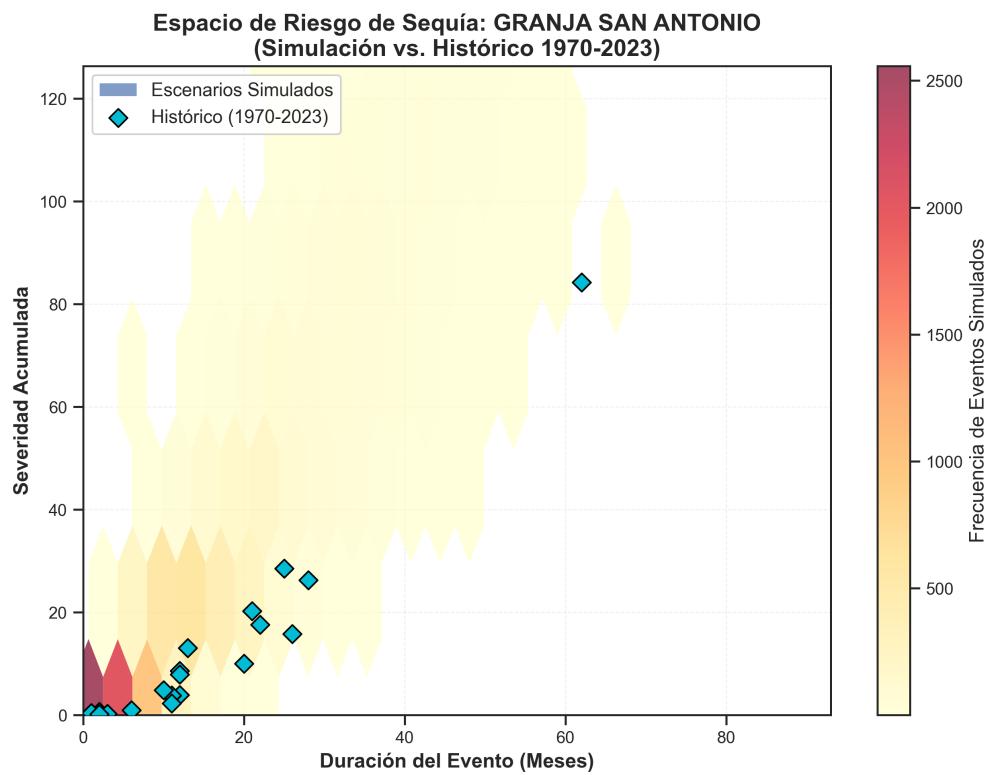


Figura F.12: Predicción de riesgo y probabilidad condicional para la estación Granja San Antonio.

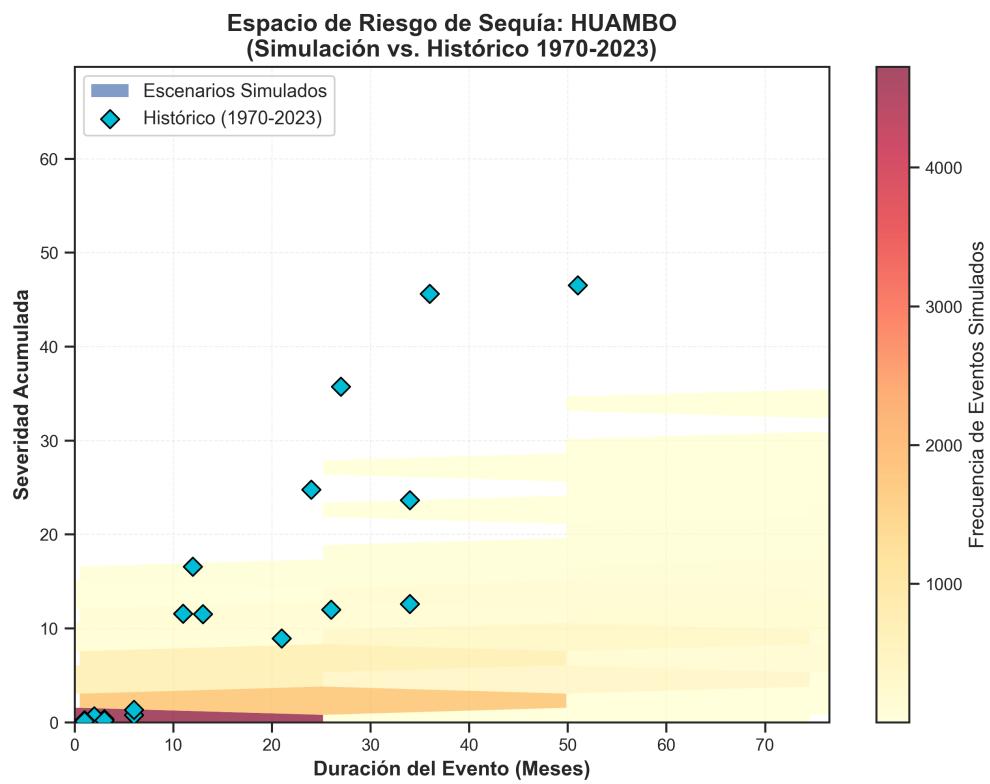


Figura F.13: Predicción de riesgo y probabilidad condicional para la estación Huambo.

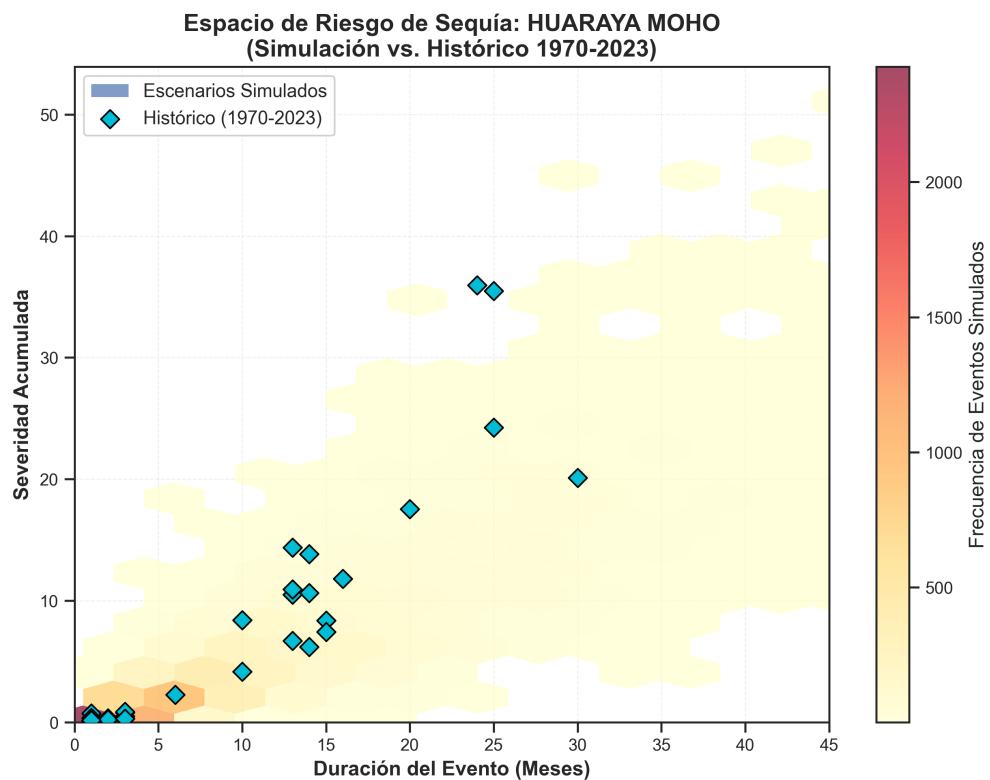


Figura F.14: Predicción de riesgo y probabilidad condicional para la estación Huaraya Moho.

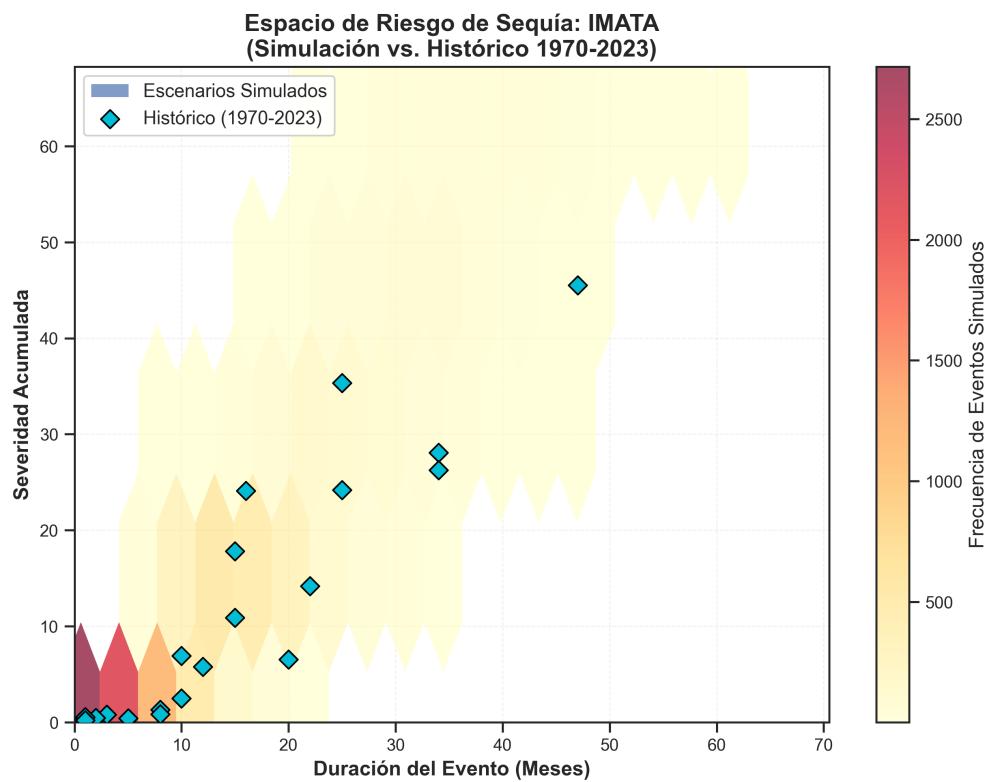


Figura F.15: Predicción de riesgo y probabilidad condicional para la estación Imata.

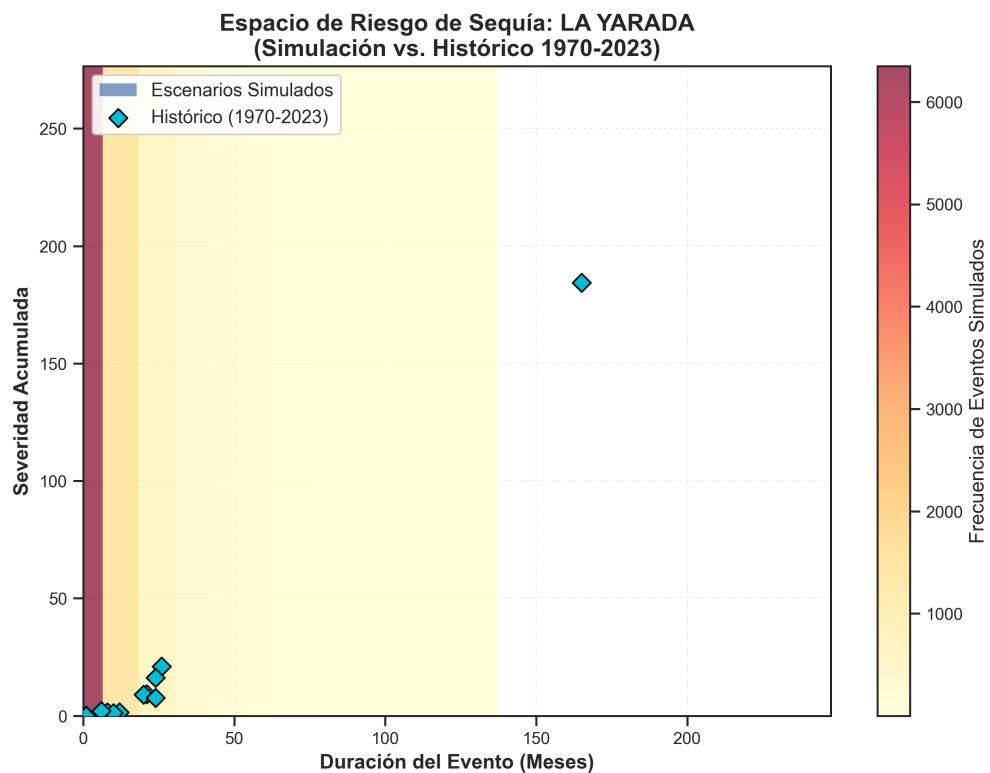


Figura F.16: Predicción de riesgo y probabilidad condicional para la estación La Yarada.

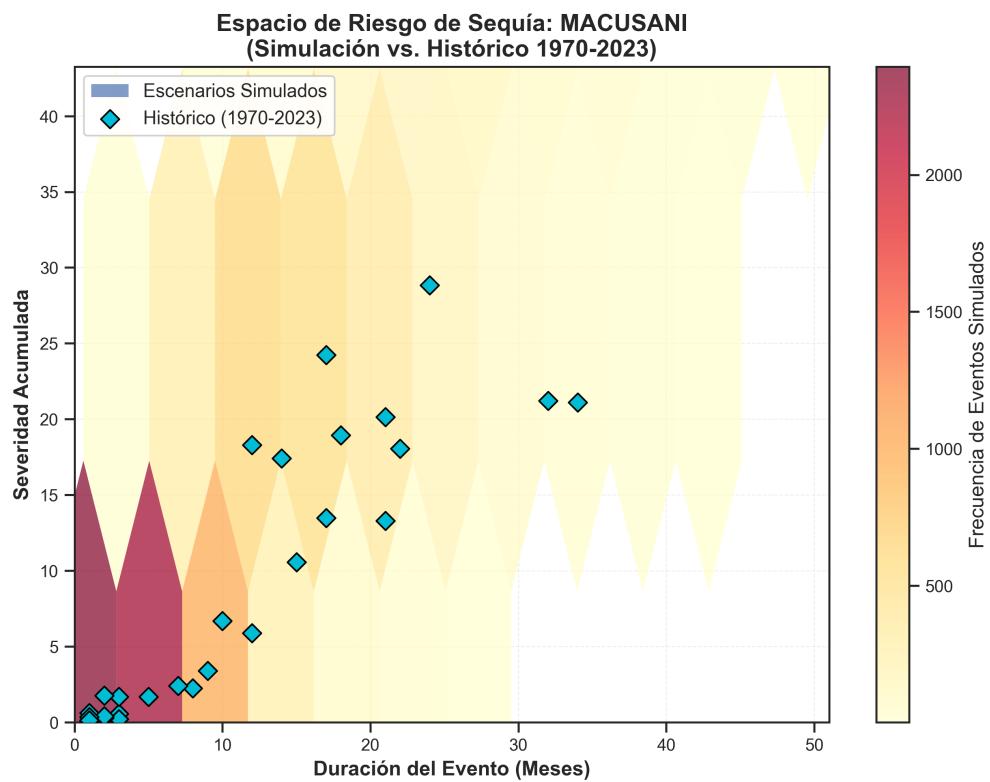


Figura F.17: Predicción de riesgo y probabilidad condicional para la estación Macusani.

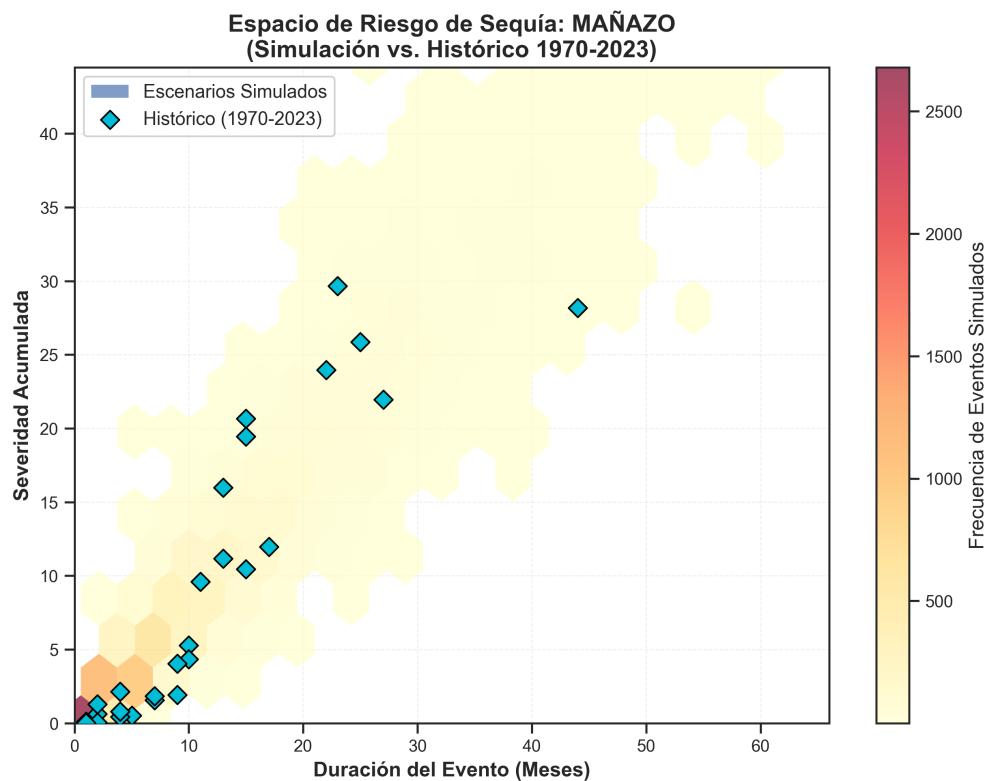


Figura F.18: Predicción de riesgo y probabilidad condicional para la estación Mañazo.

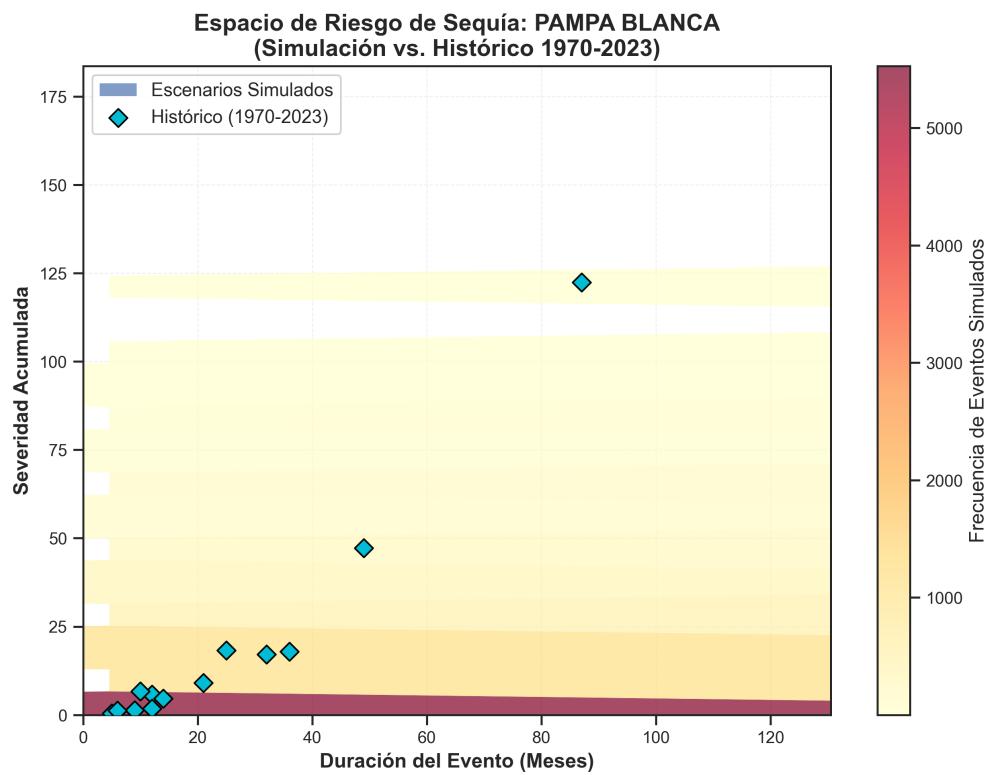


Figura F.19: Predicción de riesgo y probabilidad condicional para la estación Pampa Blanca.

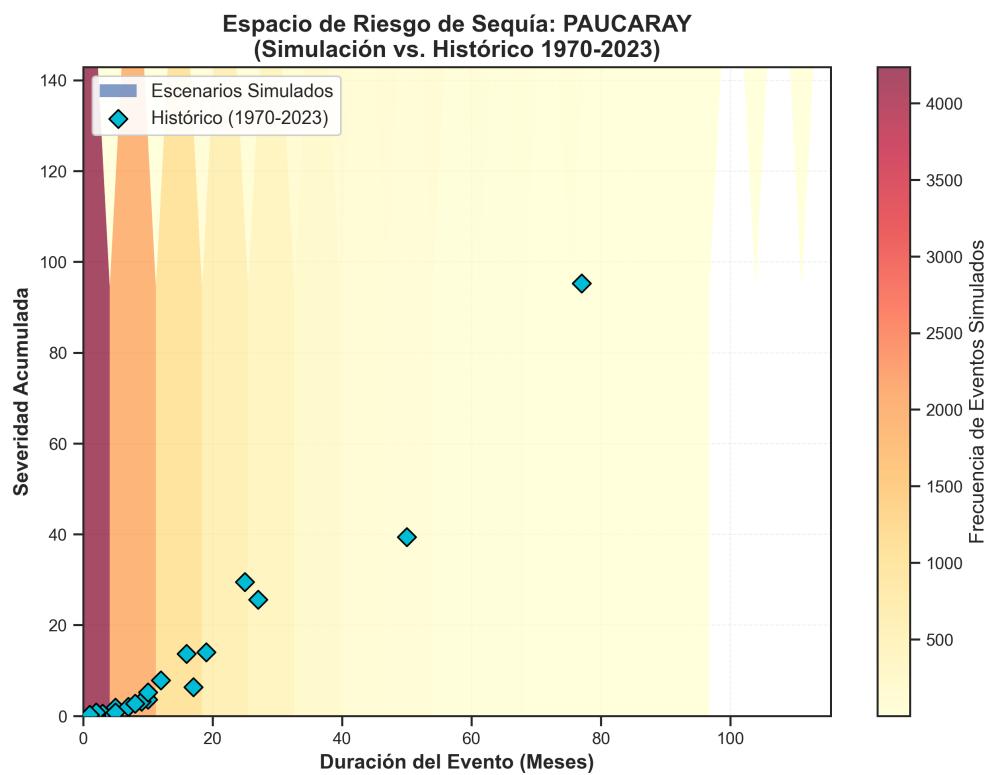


Figura F.20: Predicción de riesgo y probabilidad condicional para la estación Paucaray.

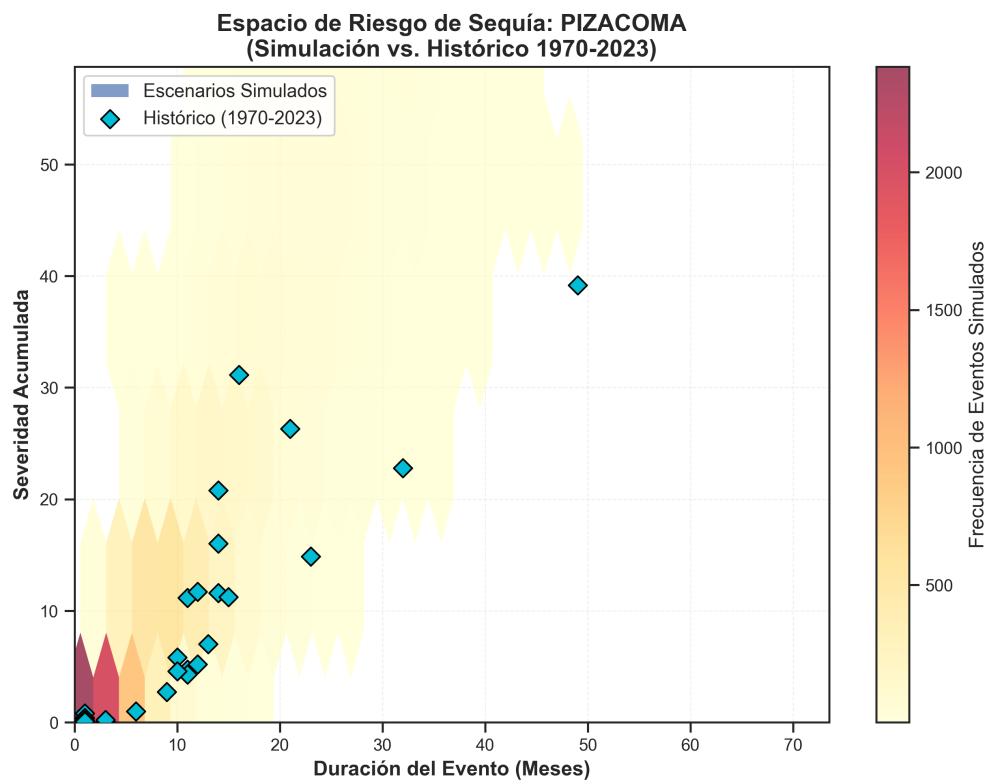


Figura F.21: Predicción de riesgo y probabilidad condicional para la estación Pizacoma.

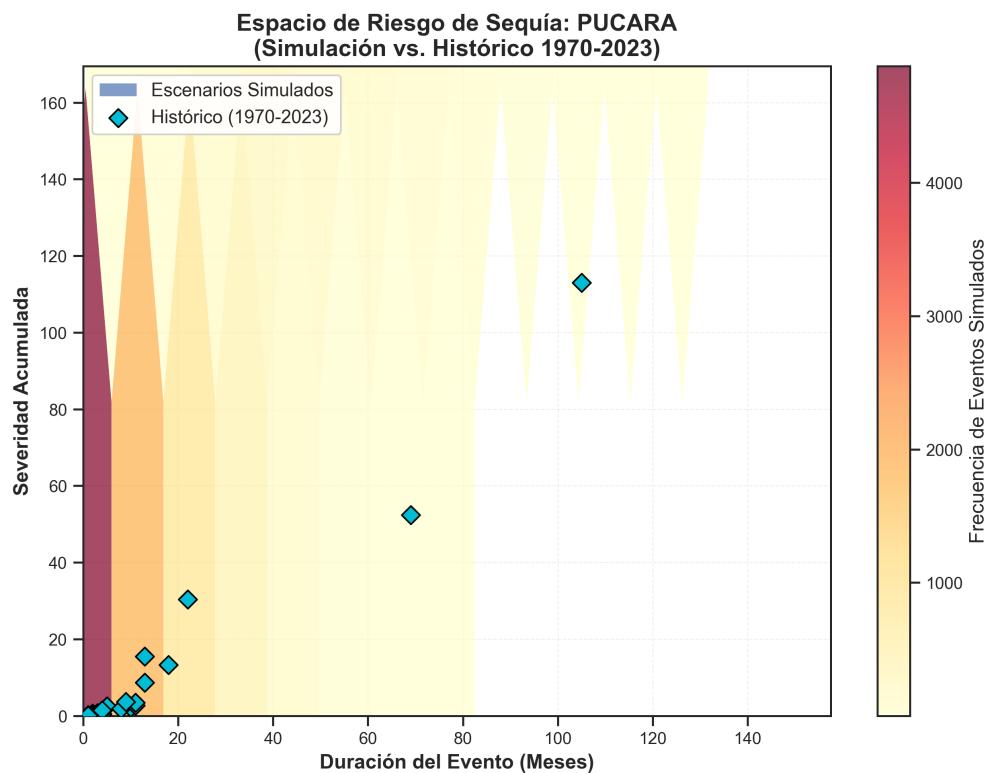


Figura F.22: Predicción de riesgo y probabilidad condicional para la estación Pucará.

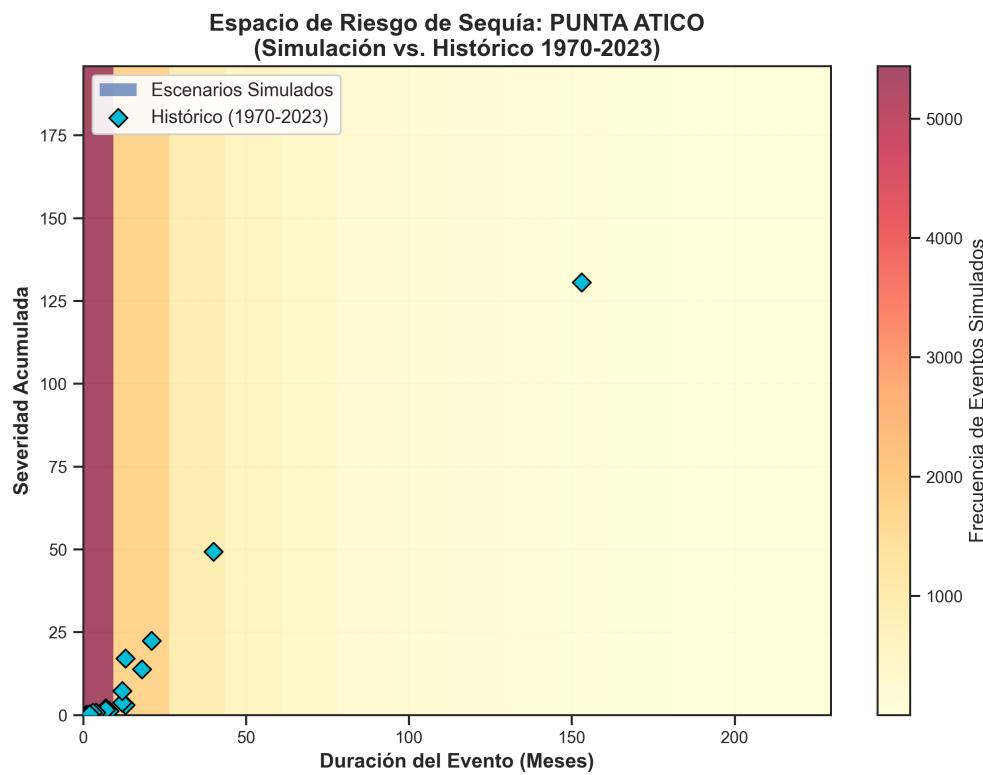


Figura F.23: Predicción de riesgo y probabilidad condicional para la estación Punta Atico.

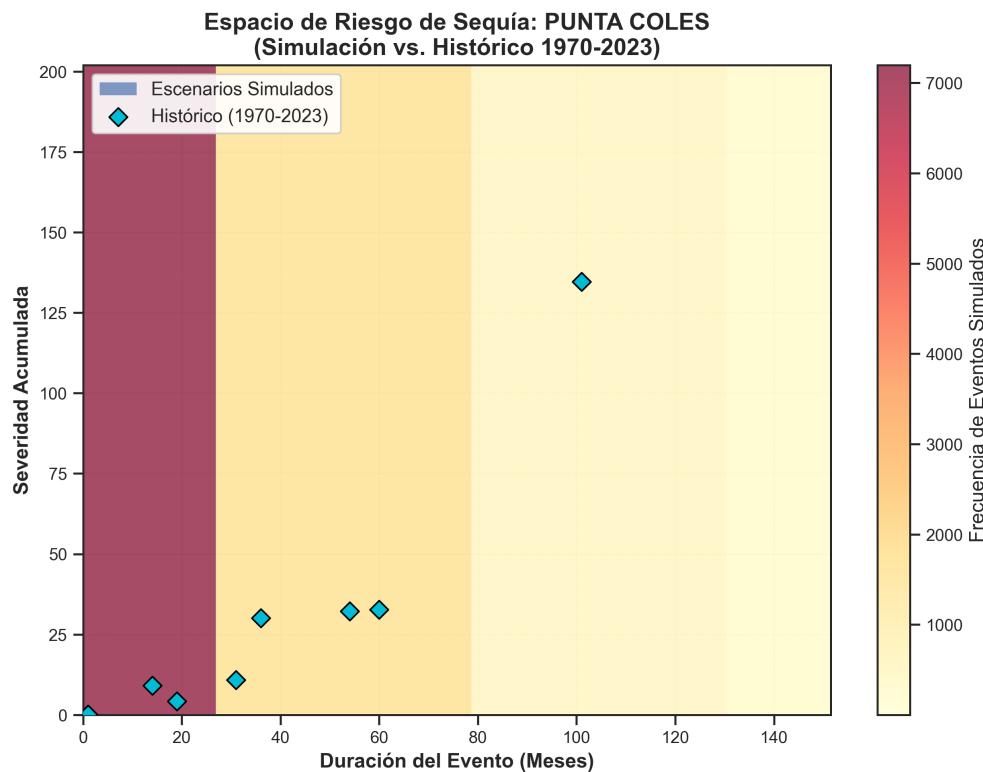


Figura F.24: Predicción de riesgo y probabilidad condicional para la estación Punta Coles.

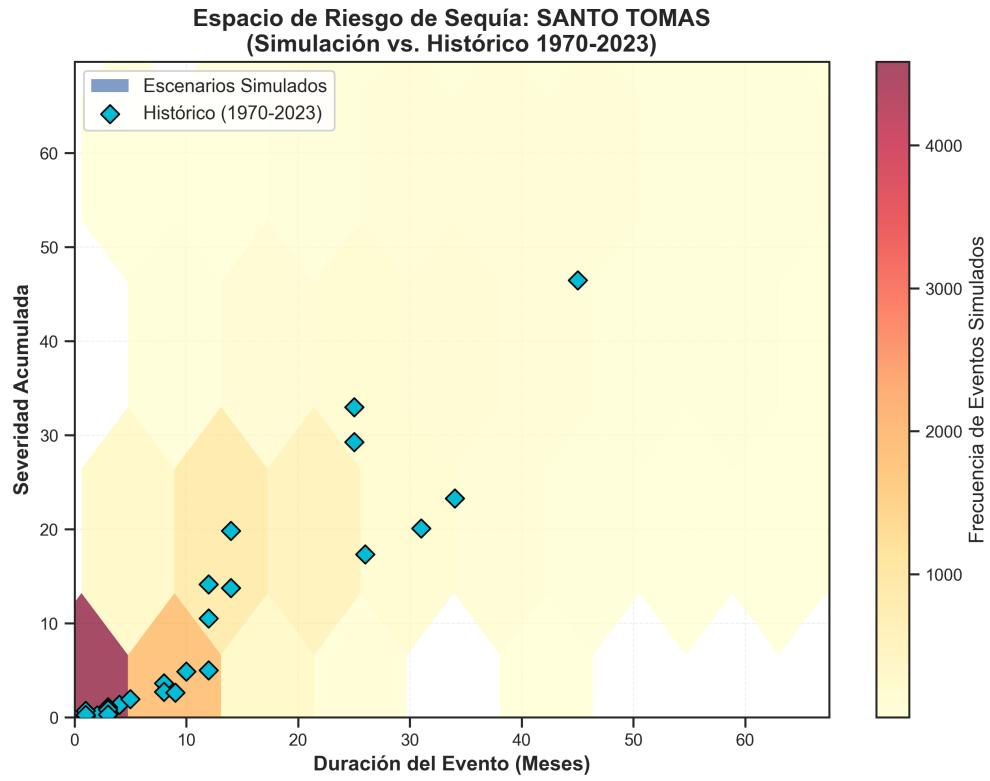


Figura F.25: Predicción de riesgo y probabilidad condicional para la estación Santo Tomás.

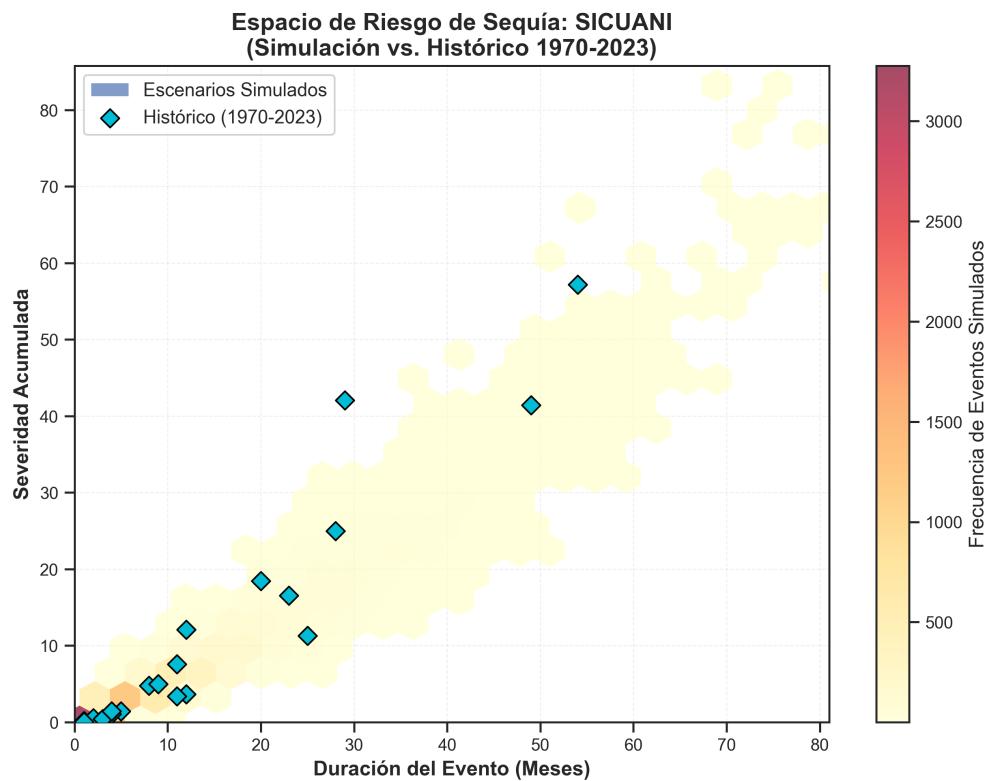


Figura F.26: Predicción de riesgo y probabilidad condicional para la estación Sicuani.

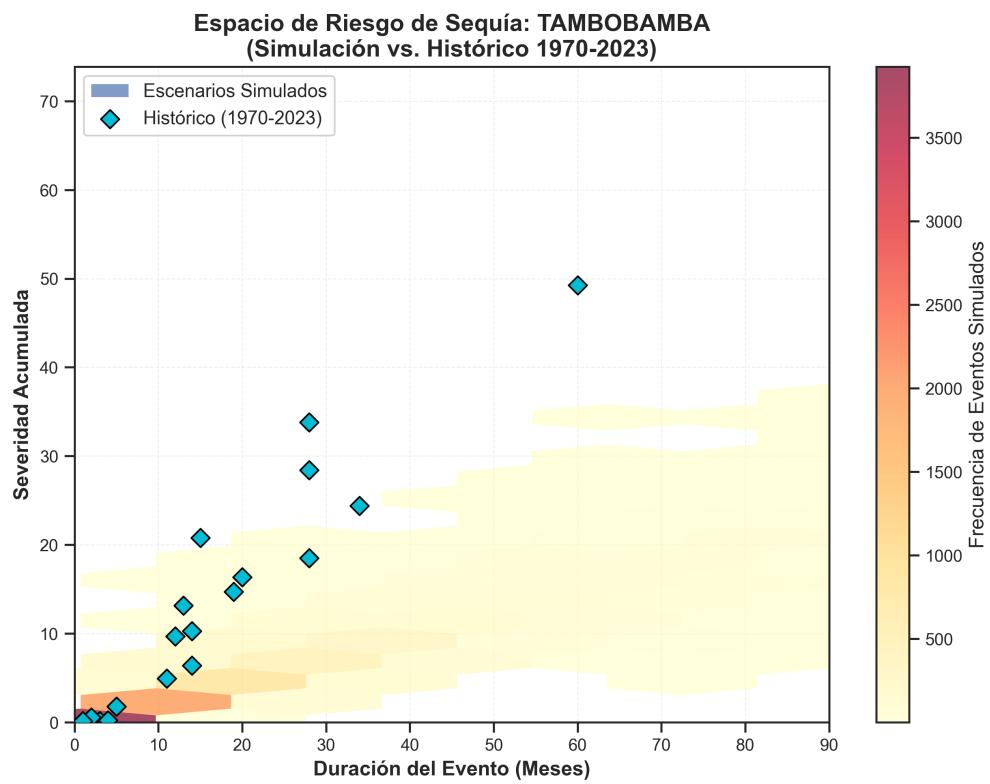


Figura F.27: Predicción de riesgo y probabilidad condicional para la estación Tambo-bamba.

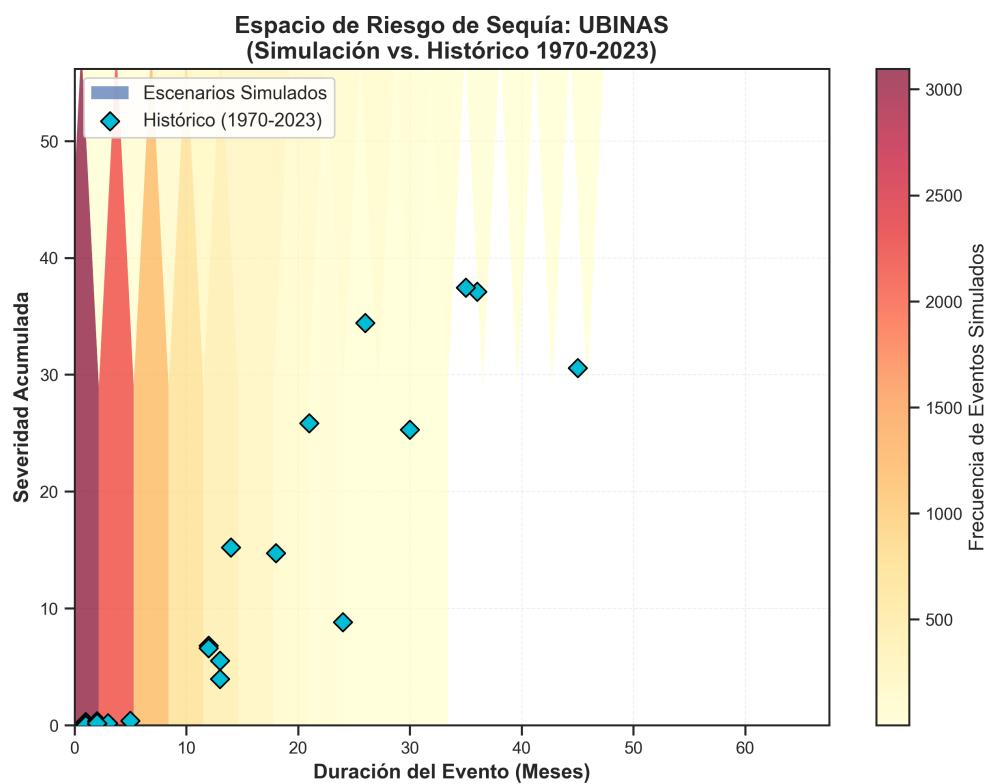


Figura F.28: Predicción de riesgo y probabilidad condicional para la estación Ubinas.

Capítulo G

Distribución Espacial del Riesgo de Sequía

En este anexo se presenta la regionalización del riesgo de sequía en el sur del Perú. Los mapas fueron generados mediante interpolación espacial de las probabilidades de riesgo simuladas para escenarios de duración crítica de 3, 6 y 12 meses. Los colores más cálidos (rojo) indican zonas con mayor probabilidad de enfrentar eventos de sequía de larga duración.

Mapa de Riesgo de Sequía - Escenario: 3 Meses
Región Sur del Perú

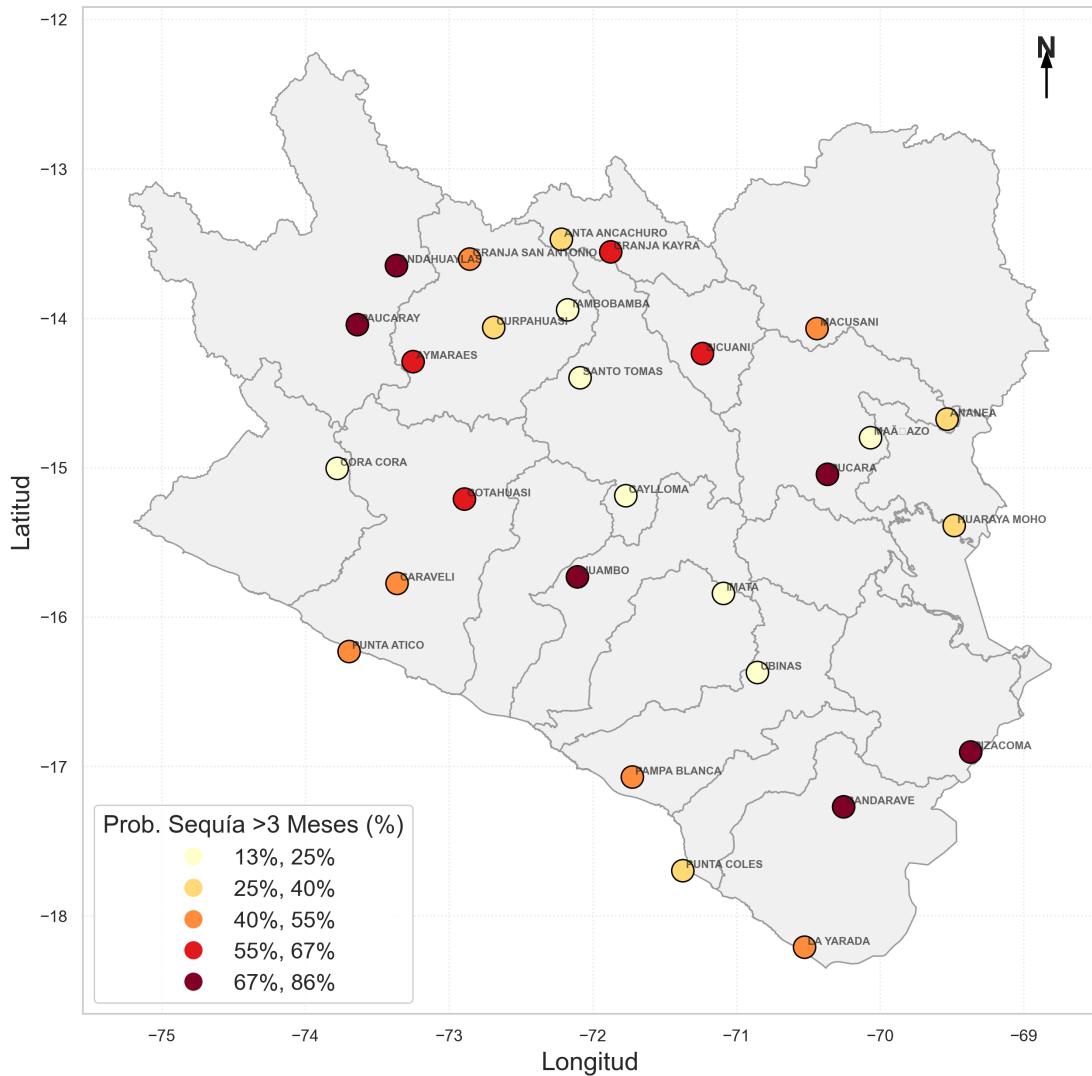


Figura G.1: Mapa de riesgo de sequía: Escenario de corto plazo (> 3 meses).

Mapa de Riesgo de Sequía - Escenario: 6 Meses
Región Sur del Perú

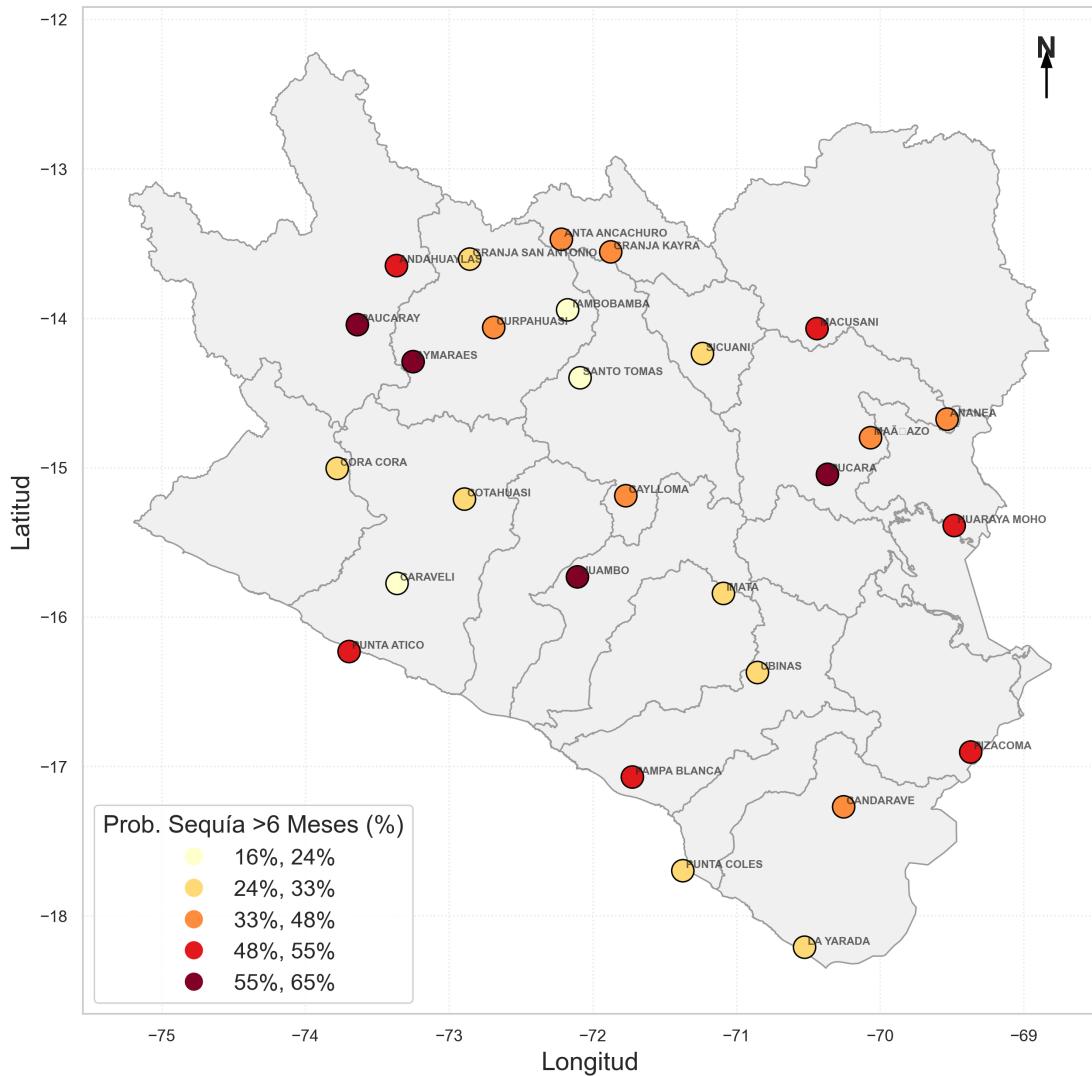


Figura G.2: Mapa de riesgo de sequía: Escenario de mediano plazo (> 6 meses).

Mapa de Riesgo de Sequía - Escenario: 12 Meses
Región Sur del Perú

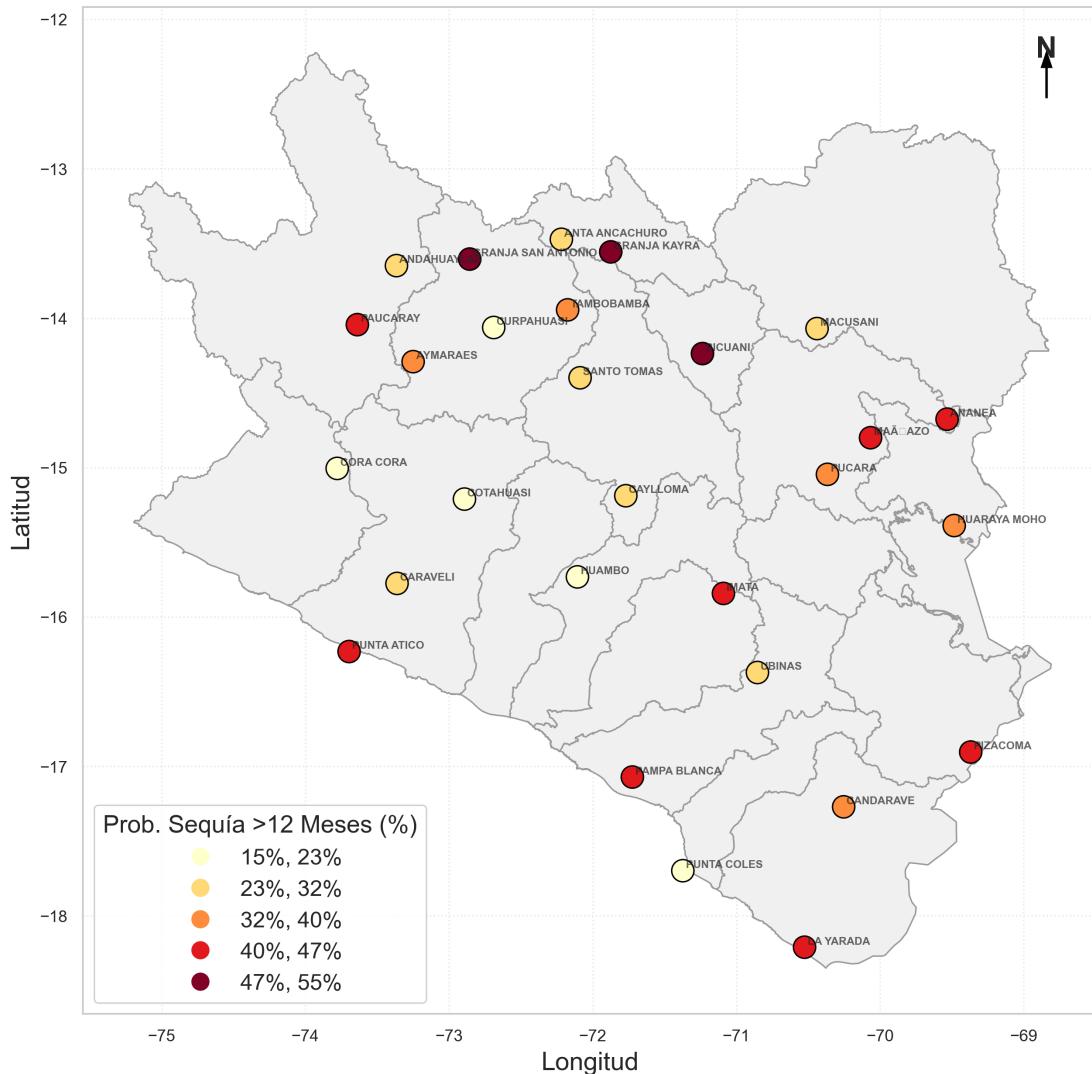


Figura G.3: Mapa de riesgo de sequía: Escenario de largo plazo (> 12 meses).

Capítulo H

Mapas de Vulnerabilidad Integral (Física y Social)

En este anexo se presenta la evaluación espacial de la vulnerabilidad integral ante sequías en la región sur del Perú. La cartografía resultante integra el modelado estocástico del riesgo climático con capas de sensibilidad física (red hidrográfica, glaciares, cuerpos de agua) y exposición social (comunidades campesinas, nativas y centros de salud), para escenarios de duración crítica de 3, 6 y 12 meses.

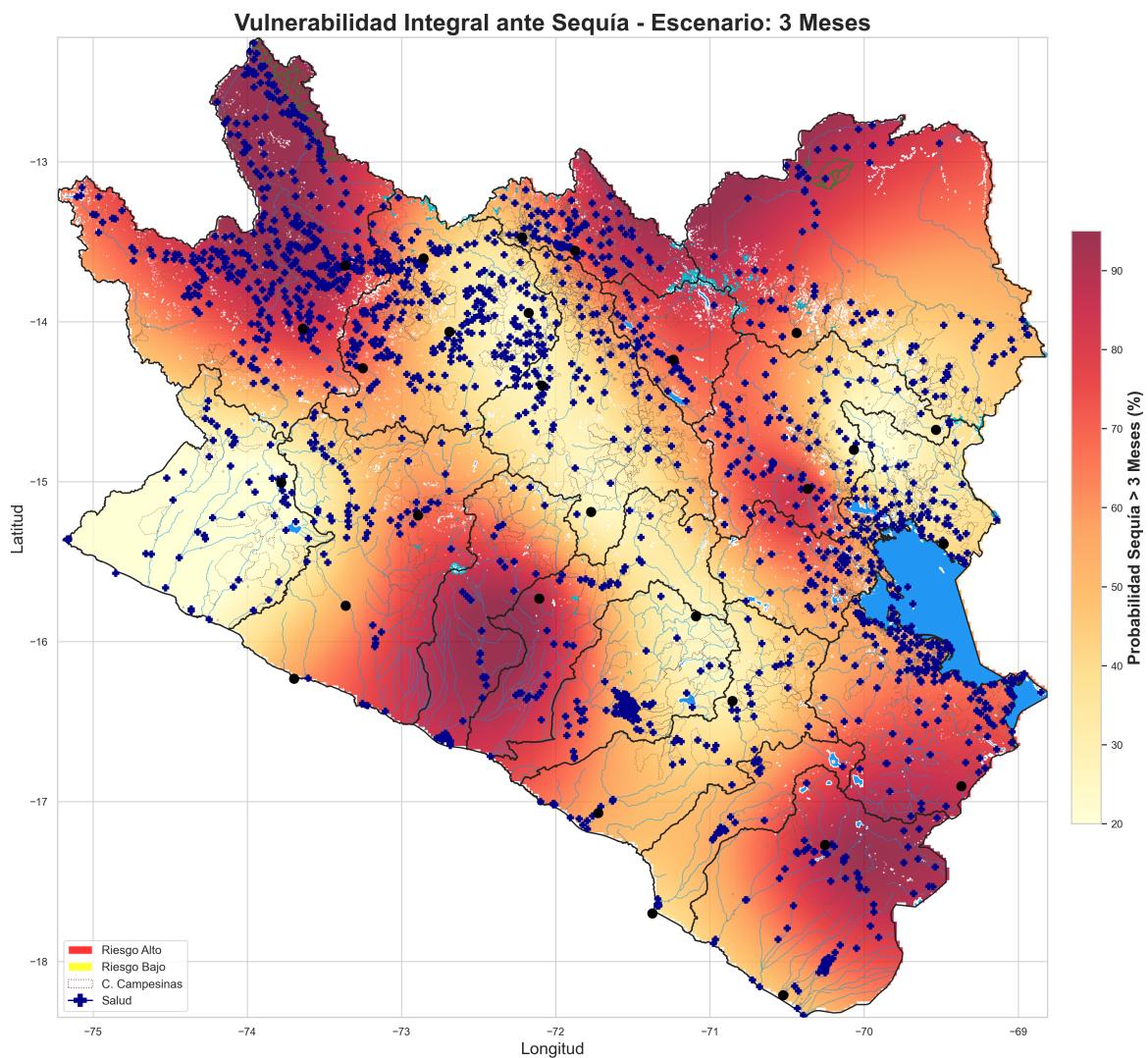


Figura H.1: Distribución de la vulnerabilidad integral ante sequías de corto plazo (> 3 meses), considerando la interacción entre amenaza climática y elementos expuestos.

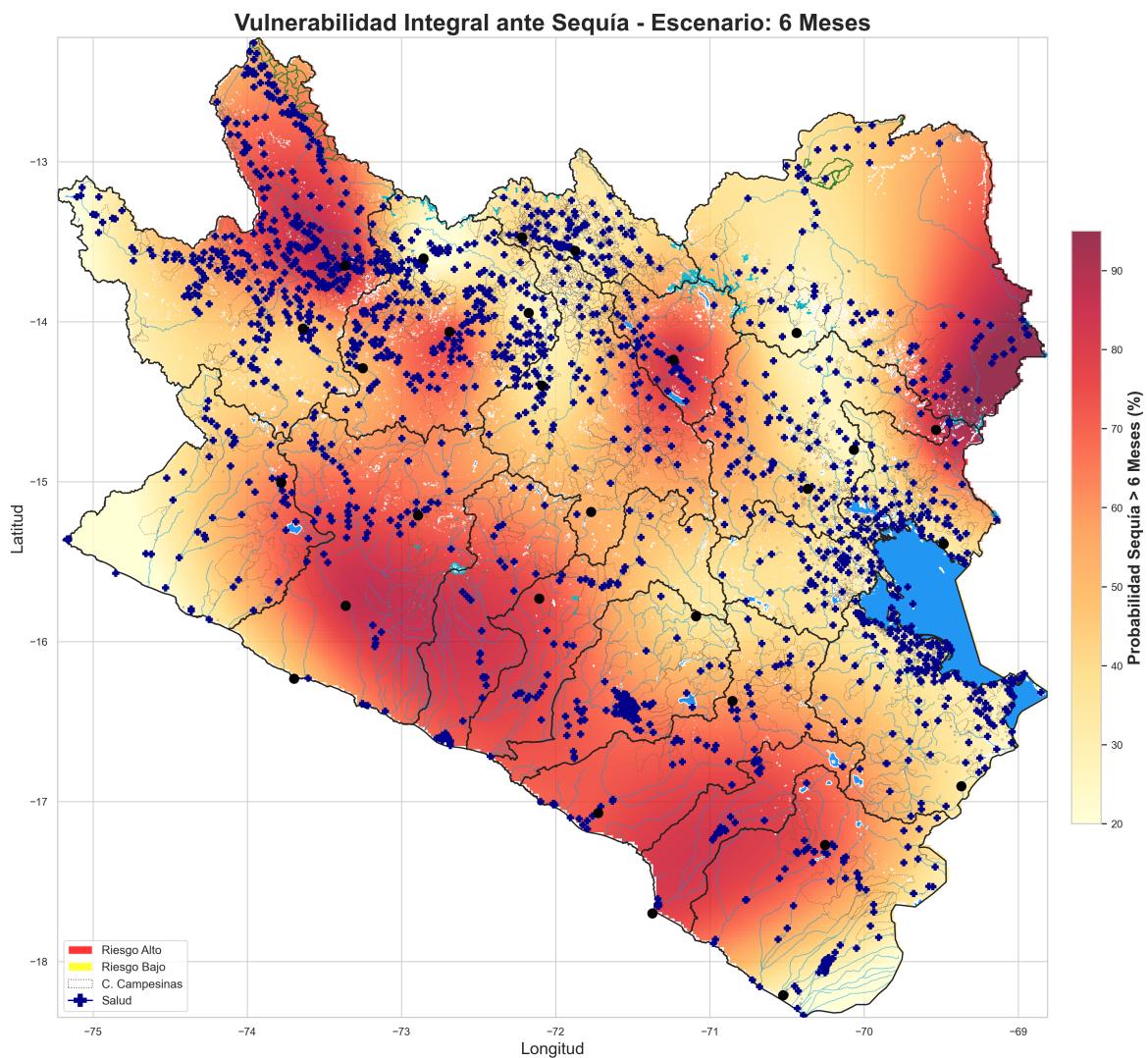


Figura H.2: Distribución de la vulnerabilidad integral ante sequías de mediano plazo (> 6 meses). Nótese la expansión de zonas críticas sobre áreas agrícolas y comunidades campesinas.

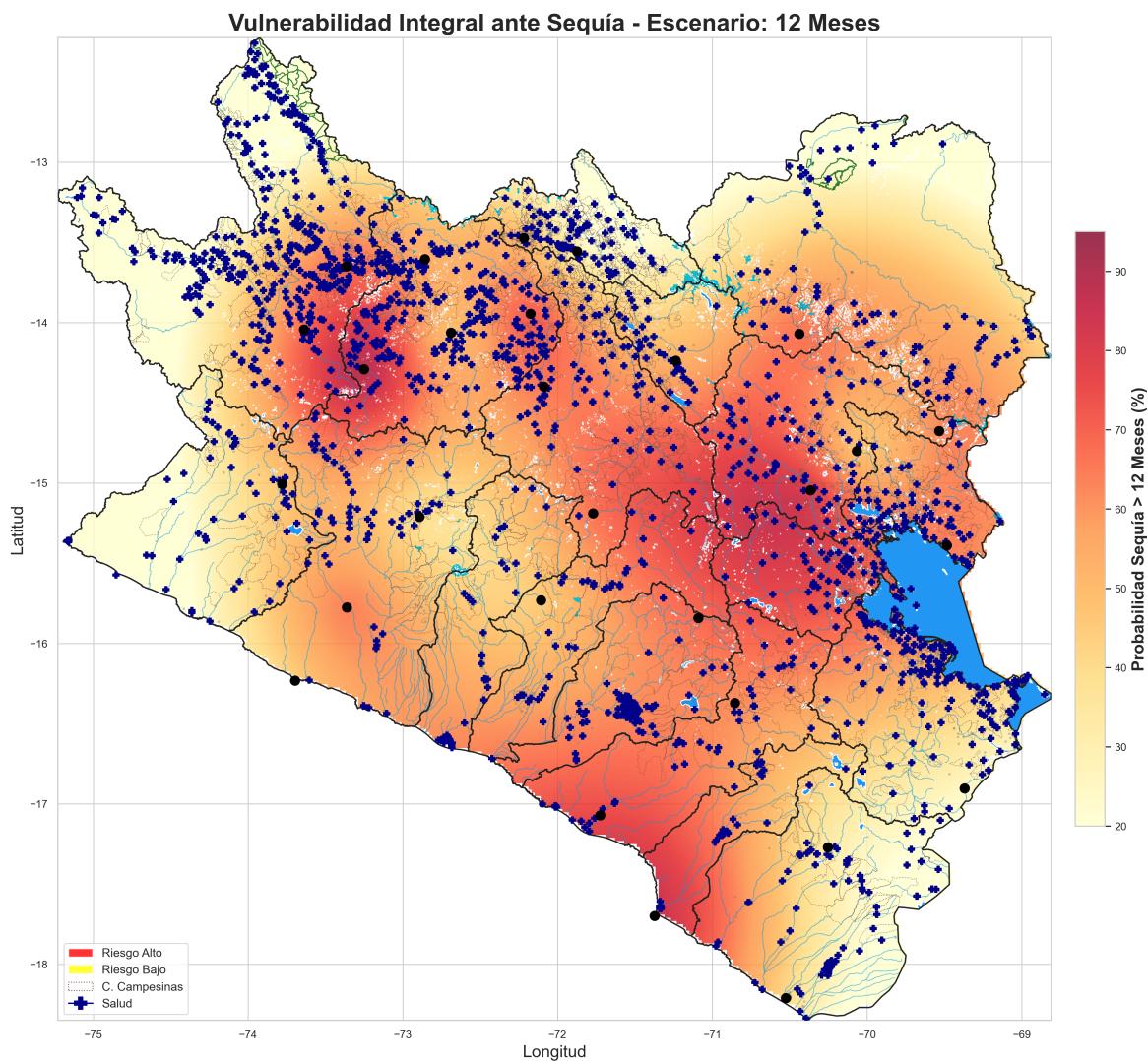


Figura H.3: Escenario crítico de vulnerabilidad integral ante sequías de largo plazo (> 12 meses), evidenciando el estrés sobre recursos hídricos estratégicos y poblaciones vulnerables.

Capítulo I

Códigos en Lenguaje Python

I.1. Mapas de Validación Cruzada

En esta sección se presentan los mapas empleados para la validación cruzada del modelo geoestadístico de Kriging, utilizados para evaluar el desempeño predictivo del interpolador espacial aplicado a las variables climáticas.

Figura I.1: Validación cruzada del modelo Kriging esférico.

I.2. Procesamiento y Análisis de Datos Climáticos

En esta sección se presentan fragmentos representativos del código desarrollado en lenguaje Python para el procesamiento, exploración y validación de las bases de datos climáticas empleadas en la investigación.

I.2.1. Carga y verificación estructural de la base de datos SENAMHI

El siguiente código permite cargar la base de datos climática del SENAMHI, verificar su estructura y realizar una inspección preliminar de las variables temporales y meteorológicas.

```
1 import pandas as pd
2 import os
3
4 # Carga de la base de datos
5 ruta = r"D:\Analisis_Senamhi\TESIS_FINAL_DATA\
6     SENAMHI_MAESTRO_TESIS_OFICIAL.csv"
6 df = pd.read_csv(ruta) if os.path.exists(ruta) else pd.DataFrame()
7
8 # Conversión de la variable temporal
9 if 'FECHA' in df.columns:
10     df['FECHA'] = pd.to_datetime(df['FECHA'])
11
12 # Inspección estructural básica
13 df.head()
14 df.tail()
15 df.info()
```

Listing I.1: Carga y verificación estructural de la base de datos SENAMHI

I.2.2. Auditoría visual del proceso de imputación MICE

Este fragmento de código ilustra el procedimiento de auditoría visual empleado para comparar las series temporales originales con aquellas imputadas mediante el método de imputación múltiple por ecuaciones encadenadas (MICE), con el fin de verificar la coherencia temporal y la preservación de la variabilidad climática.

```
1 import pandas as pd
2 import matplotlib.pyplot as plt
3
4 # Carga de datos originales e imputados
5 df_orig = pd.read_csv("1_DATA_ORIGINAL_4VARS.csv", parse_dates=['FECHA'])
6 df_mice = pd.read_csv("2_DATA_MICE_4VARS.csv", parse_dates=['FECHA'])
7
8 # Definición de estilos por variable climática
9 estilos = {
10     'PT101': ('Precipitación (mm)', 'red', 'darkblue'),
11     'TM101': ('Temperatura (°C)', 'orange', 'black'),
12     'HR101': ('Humedad (%)', 'lightgreen', 'darkgreen')
13 }
14
15 # Comparación gráfica por estación y variable
16 for var, (label_y, c_mice, c_orig) in estilos.items():
17     for est in df_orig['ESTACION'].unique():
18
19         orig = df_orig[(df_orig['VARIABLE'] == var) &
20                         (df_orig['ESTACION'] == est)]
21
22         mice = df_mice[(df_mice['VARIABLE'] == var) &
23                         (df_mice['ESTACION'] == est)]
24
25         if mice.empty:
26             continue
27
28         plt.figure(figsize=(10,5))
29         plt.plot(mice['FECHA'], mice['VALOR'],
30                 color=c_mice, alpha=0.5, label='Imputado (MICE)')
31         plt.plot(orig['FECHA'], orig['VALOR'],
32                 color=c_orig, linewidth=1, label='Original')
33         plt.ylabel(label_y)
34         plt.legend()
35         plt.grid(True)
36         plt.show()
```

Listing I.2: Auditoría visual de la imputación MICE mediante comparación temporal

I.2.3. Cálculo de la evapotranspiración de referencia (ETo)

El siguiente código implementa el cálculo de la evapotranspiración de referencia (ETo) diaria mediante la formulación FAO-56 Penman–Monteith, adaptada para condiciones de disponibilidad limitada de variables meteorológicas. Esta aproximación es ampliamente utilizada en estudios hidrológicos y climáticos en regiones donde no se dispone de mediciones completas de radiación solar.

```
1 import numpy as np
2 import pandas as pd
3
4 def calcular_eto_fao56_limitada(df):
5     """
6         Calcula la evapotranspiración de referencia (ETo) diaria
7         usando FAO-56 Penman-Monteith con información meteorológica
8         limitada.
9     """
10    df = df.copy()
11    df['FECHA'] = pd.to_datetime(df['FECHA'])
12
13    # --- Constantes físicas ---
14    Gsc = 0.0820          # Constante solar (MJ m-2 min-1)
15    sigma = 4.903e-9      # Constante Stefan-Boltzmann (MJ K-4 m-2
16    #dia-1)
17
18    # --- Variables astronómicas ---
19    phi = np.deg2rad(df['LATITUD'])
20    J = df['FECHA'].dt.dayofyear
21
22    dr = 1 + 0.033 * np.cos(2 * np.pi * J / 365)
23    delta = 0.409 * np.sin((2 * np.pi * J / 365) - 1.39)
24    omega_s = np.arccos(np.clip(-np.tan(phi) * np.tan(delta), -1,
25                                1))
26
27    Ra = (24 * 60 / np.pi) * Gsc * dr * (
28        omega_s * np.sin(phi) * np.sin(delta) +
29        np.cos(phi) * np.cos(delta) * np.sin(omega_s)
30    )
31
32    # --- Estimación de radiación solar ---
33    Rs = 0.17 * np.sqrt(12.0) * Ra
34    Rso = (0.75 + 2e-5 * df['ALTITUD']) * Ra
35    Rns = (1 - 0.23) * Rs
36
37    # --- Radiación neta de onda larga ---
38    es = 0.6108 * np.exp((17.27 * df['TM101']) / (df['TM101'] +
39                           237.3))
40    ea = es * (df['HR101'] / 100)
41    T_k = df['TM101'] + 273.16
42
43    Rnl = sigma * (T_k ** 4) * (0.34 - 0.14 * np.sqrt(ea)) * \
44        (1.35 * np.clip(Rs / (Rso + 1e-10), 0.3, 1.0) - 0.35)
```

```

41 Rn = Rns - Rnl
42
43
44 # --- Parámetros psicrométricos ---
45 P = 101.3 * ((293 - 0.0065 * df['ALTITUD']) / 293) ** 5.26
46 gamma = 0.000665 * P
47 Delta = (4098 * es) / ((df['TM101'] + 237.3) ** 2)
48
49 # --- FAO-56 Penman-Monteith ---
50 u2 = df['VTMED']
51 ETo = ((0.408 * Delta * Rn) +
52         (gamma * (900 / (df['TM101'] + 273)) * u2 * (es - ea)))
53         /
54         (Delta + gamma * (1 + 0.34 * u2)))
55
56 return ETo.clip(lower=0)
57
58 # Aplicación del modelo
59 df_mice['ETo'] = calcular_eto_fao56_limitada(df_mice)

```

Listing I.3: Cálculo de la evapotranspiración de referencia (ETo) mediante FAO-56 con datos limitados

I.2.4. Conversión de la evapotranspiración diaria a escala mensual

Con el objetivo de asegurar la comparabilidad entre la evapotranspiración de referencia y la precipitación acumulada mensual, la ETo diaria obtenida mediante la formulación FAO-56 fue agregada a escala mensual. Para ello, se consideró el número exacto de días de cada mes, incluyendo la corrección automática para años bisiestos.

```

1 # Número de días por mes (considera años bisiestos)
2 df_mice['DIAS_EN_MES'] = df_mice['FECHA'].dt.days_in_month
3
4 # Conversión de ETo diaria (mm/día) a ETo mensual (mm/mes)
5 df_mice['ETO_MENSUAL'] = df_mice['ETo'] * df_mice['DIAS_EN_MES']
6
7 # Resumen estadístico
8 print(df_mice['ETO_MENSUAL'].describe())

```

Listing I.4: Conversión de ETo diaria a evapotranspiración mensual acumulada