



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE FOMENTO

MINISTERIO
DE AGRICULTURA, ALIMENTACIÓN
Y MEDIO AMBIENTE

CEDEX
CENTRO DE ESTUDIOS
Y EXPERIMENTACIÓN
DE OBRAS PÚBLICAS

INFORME TÉCNICO
para

Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente
Secretaría de Estado de Medio Ambiente
Dirección General del Agua

**ASISTENCIA TÉCNICA, INVESTIGACIÓN Y
DESARROLLO TECNOLÓGICO EN MATERIAS
DE COMPETENCIA DE LA DIRECCIÓN
GENERAL DEL AGUA (2007-2011)**

**ELABORACIÓN Y MANTENIMIENTO DE UN SISTEMA DE
INDICADORES HIDROLÓGICOS Y ESTUDIOS PARA LA
IDENTIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE SEQUÍAS**
CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA DE SEQUÍAS

AVANCE
TOMO ÚNICO

Clave CEDEX: 42-405-1-082

Madrid, noviembre de 2013

Centro de Estudios Hidrográficos



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE FOMENTO

MINISTERIO
DE AGRICULTURA,
ALIMENTACIÓN Y
MEDIO AMBIENTE

CEDEX

CENTRO DE ESTUDIOS
Y EXPERIMENTACIÓN
DE OBRAS PÚBLICAS

INFORME TÉCNICO

para

Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente

Secretaría de Estado de Medio Ambiente

Dirección General del Agua

ASISTENCIA TÉCNICA, INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO TECNOLÓGICO EN MATERIAS DE COMPETENCIA DE LA DIRECCIÓN GENERAL DEL AGUA (2007-2011)

**ELABORACIÓN Y MANTENIMIENTO DE UN SISTEMA DE
INDICADORES HIDROLÓGICOS Y ESTUDIOS PARA LA
IDENTIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE SEQUÍAS**

CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA DE SEQUÍAS

AVANCE

TOMO ÚNICO

Clave CEDEX: 42-405-1-082

Madrid, noviembre de 2013

Centro de Estudios Hidrográficos



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE FOMENTO

MINISTERIO
DE AGRICULTURA,
ALIMENTACIÓN Y
MEDIO AMBIENTE

CEDEX
CENTRO DE ESTUDIOS
Y EXPERIMENTACIÓN
DE OBRAS PÚBLICAS

TÍTULO:

**ASISTENCIA TÉCNICA, INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO
TECNOLÓGICO EN MATERIAS COMPETENCIA DE LA
DIRECCIÓN GENERAL DEL AGUA (2007-2011)**

**ELABORACIÓN Y MANTENIMIENTO DE UN SISTEMA DE INDICADORES
HIDROLÓGICOS Y ESTUDIOS PARA LA IDENTIFICACIÓN Y
CARACTERIZACIÓN DE SEQUÍAS**

CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA DE SEQUÍAS

AVANCE

CLIENTE:

Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente
Secretaría de Estado de Medio Ambiente
Dirección General del Agua

EL PRESENTE INFORME CONSTITUYE UN DOCUMENTO OFICIAL DE ESTE TRABAJO Y, DE ACUERDO CON LAS NORMAS GENERALES DEL ORGANISMO, SU ENTREGA SUPONE EL CUMPLIMIENTO DE LAS ACTUACIONES TÉCNICAS DEL MISMO REFERENTES A LA MATERIA OBJETO DEL INFORME.

VALIDEZ OFICIAL

VISTO EL CONTENIDO DEL INFORME Y SIENDO ACORDE CON LAS CLÁUSULAS DEL CONVENIO DE COLABORACIÓN CORRESPONDIENTE, SE PROPONE AUTORIZAR SU EMISIÓN.

EL DIRECTOR DEL CENTRO DE ESTUDIOS HIDROGRÁFICOS

Fdo. Federico Estrada Lorenzo

AUTORIZA LA EMISIÓN DEL INFORME:

Madrid, a de noviembre de 2013

EL DIRECTOR DEL CEDEX

Fdo. Mariano Navas Gutiérrez

SOLO SON INFORMES OFICIALES DEL CENTRO DE ESTUDIOS Y EXPERIMENTACIÓN DE OBRAS PÚBLICAS (CEDEX) LOS REFRENDADOS POR SU DIRECCIÓN

**ASISTENCIA TÉCNICA, INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO
TECNOLÓGICO EN MATERIAS COMPETENCIA DE LA
DIRECCIÓN GENERAL DEL AGUA (2007-2011)**

**ELABORACIÓN Y MANTENIMIENTO DE UN SISTEMA DE
INDICADORES HIDROLÓGICOS Y ESTUDIOS PARA LA
IDENTIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE SEQUÍAS**

CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA DE SEQUÍAS

AVANCE

Madrid, noviembre de 2013

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1	ANTECEDENTES	1
2	SEQUÍAS	3
2.1	DEFINICIONES	3
2.2	PARÁMETROS Y VARIABLES ALEATORIAS	9
2.3	PERIODO DE RETORNO Y SEQUÍAS.....	12
2.4	ÍNDICES BASADOS EN SERIES HIDROMETEOROLÓGICAS.....	14
2.4.1	<i>Anomalía respecto a la Media.....</i>	<i>14</i>
2.4.2	<i>Algoritmo del Pico Siguierte y Desviación Acumulada</i>	<i>15</i>
2.4.3	<i>Quintil, Cuartil, Decil y Percentil y Probabilidad No Paramétrica.....</i>	<i>15</i>
2.4.4	<i>Valor Estandarizado.....</i>	<i>17</i>
2.4.5	<i>Índice de Precipitación Efectiva o Effective Drought Index (EDI).....</i>	<i>19</i>
2.4.6	<i>Índice de Precipitación Estandarizado (IPE) o Standardized Precipitation Index (SPI)</i>	<i>21</i>
2.4.7	<i>Índice de Palmer o Palmer Drought Severity Index (PDSI).....</i>	<i>23</i>
2.4.8	<i>Índice de Humedad del Cultivo o Crop Moisture Index (CMI)</i>	<i>28</i>
2.4.9	<i>Índices de Suministro de Aguas Superficiales o Surface Water Supply Index (SWSI) y del Bureau of Reclamation (RDI).....</i>	<i>30</i>
2.4.10	<i>Otros Indicadores.....</i>	<i>31</i>
2.4.10.1	<i>Water Exploitation Index (WEI)</i>	<i>31</i>
2.4.10.2	<i>Indicador de Aridez de Palfai (PAI)</i>	<i>32</i>
2.4.10.3	<i>Índice del Potencial AgroHidrológico (AHP).....</i>	<i>33</i>
2.4.10.4	<i>Índice de Disponibilidad del Recurso Hídrico o Available Water Resources Index (AWRI)</i>	<i>33</i>
2.4.11	<i>Síntesis Parcial</i>	<i>34</i>
2.5	ÍNDICES BASADOS EN LA TELEDETECCIÓN.....	35
2.5.1	<i>Índice de Estrés de Humedad, Moisture Stress Index (MSI).....</i>	<i>38</i>
2.5.2	<i>Índice Diferencial de Vegetación Normalizado o Normalized Difference Vegetation Index (NDVI).....</i>	<i>39</i>
2.5.2.1	<i>Anomalía del índice NDVI (NDVIA)</i>	<i>40</i>
2.5.2.2	<i>Índice de Vegetación Estandarizado/Standard Vegetation Index (SVI)</i>	<i>41</i>
2.5.2.3	<i>Índice de Estado de la Vegetación/Vegetation Condition Index (VCI)</i>	<i>42</i>
2.5.2.4	<i>Índice Ajustado de Vegetación al Suelo o Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI)</i>	<i>42</i>



2.5.3	<i>Índice Diferencial de Agua Normalizado o Normalized Difference Water Index (NDWI)</i>	43
2.5.3.1	Anomalía del índice NDWI (NDWIA).....	43
2.5.3.2	Índice de Sequedad en Vegetación/ <i>Vegetation Dryness Index (VDI)</i> ..	44
2.5.3.3	Índice Térmico de Sequedad en la Vegetación o <i>Temperature Vegetation Dryness Index (TVDI)</i>	44
2.5.3.4	Índice Térmico de Estado de la Vegetación o <i>Vegetation Temperature Condition Index (VTCI)</i>	45
2.5.3.5	Índice del Estado de Agua en la Vegetación o <i>Vegetation Condition Water Index (VCWI)</i>	46
2.5.4	<i>Índice Diferencial de Sequía Normalizado o Normalized Difference Drought Index (NDDI)</i>	46
2.5.4.1	Índice Diferencial de Sequía Normalizado Escalado o <i>Scaled Normalized Difference Drought Index (SNDDI)</i>	46
2.5.4.2	Índice Normalizado de Sequía en Superficie o <i>Normalized Surface Drought Index, (NSDI)</i>	47
2.5.5	<i>Índice Mejorado de Vegetación o Enhanced Vegetation Index (EVI)</i>	47
2.5.5.1	Índice Escalado de Estado EVI de la Vegetación o <i>Vegetation Condition EVI Index (VCEI)</i>	48
2.5.5.2	Índice Diferencial de Sequía Vegetativa Normalizado o <i>Normalized Difference Drought EVI Index (NDDEI)</i>	48
2.5.6	<i>Índice de Respuesta a la Sequía de la Vegetación o Vegetation Drought Response Index (VegDRI)</i>	48
2.5.7	<i>Síntesis Parcial</i>	49
3	IMPLEMENTACIÓN DE ÍNDICES EN ESPAÑA	55
3.1	SERIES REGIONALES DE PRECIPITACIÓN Y ESCORRENTÍA	55
3.2	RACHAS Y SEQUÍAS EN ESPAÑA DURANTE EL PERIODO DE PLANIFICACIÓN HIDROLÓGICA.....	61
3.2.1	<i>Parametrización del Modelo de Rachas</i>	61
3.2.2	<i>Sequías Identificadas</i>	61
3.2.3	<i>Conclusiones Parciales</i>	70
3.3	ÍNDICE DE PRECIPITACIÓN ESTANDARIZADA (IPE).....	70
3.3.1	<i>Fundamentos Prácticos</i>	70
3.3.2	<i>Propuesta de Índice Combinado de Varios Pasos</i>	78
3.3.3	<i>Características de las Sequías Identificadas</i>	80
3.3.4	<i>Conclusiones Parciales</i>	88



3.4	PERIODO DE RETORNO Y CURVAS DDF	88
3.4.1	<i>Objetivo</i>	88
3.4.2	<i>Metodología</i>	89
3.4.2.1	Generación de Series Sintéticas de Precipitación y Escorrentía. Modelos ARMA	89
3.4.2.2	Identificación y Caracterización de Sequías en las Series Sintéticas ...	90
3.4.2.3	Curvas DDF Regionales y Ajuste de la Distribución Bivariada y del Periodo de Retorno	91
3.4.3	<i>Identificación y Caracterización de Sequías-Periodo 1930/31-2010/11</i> ...	92
3.4.4	<i>Conclusiones Parciales</i>	99
3.5	ÍNDICE NDDI Y SEQUÍAS RECIENTES EN ESPAÑA	100
3.5.1	<i>Objetivos</i>	100
3.5.2	<i>Preprocesamiento de Imágenes</i>	100
3.5.2.1	Descarga de Imágenes	101
3.5.2.2	Georreferenciación de MOD13A1 con ModisTool	103
3.5.2.3	Cálculo del Índice Diferencial de Sequía Normalizado o Normalized Difference Drought Index (NDDI)	104
3.5.2.4	NDDI	104
3.5.3	<i>Caracterización de Sequías</i>	107
3.5.3.1	<i>NDDI</i> como Indicador de Sequía	107
3.5.3.2	Desviaciones del <i>NDDI</i> como Indicador de Sequía	111
3.5.3.3	Definición: Umbral de Sequía de Desv-NDDI en las regiones SIEH ..	116
3.5.3.4	Sequías Identificadas	118
3.5.4	<i>Conclusiones Parciales</i>	122
4	RESUMEN Y CONCLUSIONES	125
5	EQUIPO DE TRABAJO	129
6	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	131

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. TIPOS DE SEQUÍAS Y PROPAGACIÓN	4
FIGURA 2. CURVAS DE REFLECTIVIDAD DE DIVERSAS CUBIERTAS	37
FIGURA 3. REGIONES DEL SIEH	56
FIGURA 4. SERIES Y TENDENCIAS DE PRECIPITACIÓN EN LA PENÍNSULA IBÉRICA	60
FIGURA 5. SERIES Y TENDENCIAS DE ESCORRENTÍA EN LA PENÍNSULA IBÉRICA	60
FIGURA 6. RACHAS DE SEQUÍAS DE LLUVIA Y ESCORRENTÍA EN LA PENÍNSULA IBÉRICA	62
FIGURA 7. RACHAS DE SEQUÍAS DE LLUVIA Y ESCORRENTÍA EN LA CUENCA DEL ESLA EN EL DUERO	64
FIGURA 8. RACHAS DE SEQUÍAS DE LLUVIA Y ESCORRENTÍA EN LA CABECERA DEL TAJO	65
FIGURA 9. RACHAS DE SEQUÍAS DE LLUVIA Y ESCORRENTÍA EN CUENCAS DE MARGEN DERECHA EN EL BAJO GUADALQUIVIR	66
FIGURA 10. RACHAS DE SEQUÍAS DE LLUVIA Y ESCORRENTÍA EN LA CUENCA DEL SEGURA	67
FIGURA 11. RACHAS DE SEQUÍAS DE LLUVIA Y ESCORRENTÍA EN LA CABECERA DEL EBRO	68
FIGURA 12. RACHAS DE SEQUÍAS DE LLUVIA Y ESCORRENTÍA EN CUENCAS INTERNAS DE CATALUÑA	69
FIGURA 13. DISPERSIONES DE LLUVIA AGREGADA ANUAL, BIENAL, TRIENAL Y CUATRIENALMENTE FRENTE A ESCORRENTÍA	73
FIGURA 14. DISPERSIONES DE LLUVIA AGREGADA MENSUAL, TRIMESTRAL Y SEMESTRALMENTE FRENTE A ESCORRENTÍA MENSUAL EN EL ALTO JÚCAR	78
FIGURA 15. MAPAS IPE DE PASOS 1, 3, 6 Y 12 MESES EN FEBRERO DE 1970	79
FIGURA 16. IPE DE ESCORRENTÍAS EN FEBRERO DE 1970	80
FIGURA 17. SERIE DE SEQUÍAS DE LLUVIA IDENTIFICADAS POR ÁREA SECA EN ESPAÑA	81
FIGURA 18. SERIE DE SEQUÍAS DE ESCORRENTÍA IDENTIFICADAS POR ÁREA SECA EN ESPAÑA	81
FIGURA 19. CORRELOGRAMAS DE LLUVIA (IZQDA) Y ESCORRENTÍA (DRCHA)	82
FIGURA 20. SERIE DE SEQUÍAS DE LLUVIA IDENTIFICADAS POR ÁREA SECA EN CUENCAS DEL ESLA	82
FIGURA 21. SERIE DE SEQUÍAS DE ESCORRENTÍA IDENTIFICADAS POR ÁREA SECA EN CUENCAS DEL ESLA	83
FIGURA 22. SERIE DE SEQUÍAS DE LLUVIA IDENTIFICADAS POR ÁREA SECA EN CUENCAS DE CABECERA DEL TAJO	83
FIGURA 23. SERIE DE SEQUÍAS DE ESCORRENTÍA IDENTIFICADAS POR ÁREA SECA EN CUENCAS DE CABECERA DEL TAJO	84
FIGURA 24. SERIE DE SEQUÍAS DE LLUVIA IDENTIFICADAS POR ÁREA SECA EN CUENCAS DE MARGEN DERECHA DEL BAJO GUADALQUIVIR	84



CEDEX

FIGURA 25. SERIE DE SEQUÍAS DE ESCORRENTÍA IDENTIFICADAS POR ÁREA SECA EN CUENCAS DE MARGEN DERECHA DEL BAJO GUADALQUIVIR.....	85
FIGURA 26. SERIE DE SEQUÍAS DE LLUVIA IDENTIFICADAS POR ÁREA SECA EN CUENCAS DEL SEGURA	85
FIGURA 27. SERIE DE SEQUÍAS DE ESCORRENTÍA IDENTIFICADAS POR ÁREA SECA EN CUENCAS DEL SEGURA.....	86
FIGURA 28. SERIE DE SEQUÍAS DE LLUVIA IDENTIFICADAS POR ÁREA SECA EN CUENCAS DE CABECERA DEL EBRO	86
FIGURA 29. SERIE DE SEQUÍAS DE ESCORRENTÍA IDENTIFICADAS POR ÁREA SECA EN CUENCAS DE CABECERA DEL EBRO.....	87
FIGURA 30. SERIE DE SEQUÍAS DE LLUVIA IDENTIFICADAS POR ÁREA SECA EN CUENCAS INTERNAS DE CATALUÑA	87
FIGURA 31. SERIE DE SEQUÍAS DE ESCORRENTÍA IDENTIFICADAS POR ÁREA SECA EN CUENCAS INTERNAS DE CATALUÑA	87
FIGURA 32. CLASIFICACIÓN POR DURACIÓN DE LAS SEQUÍAS IDENTIFICADAS EN LAS SERIES SINTÉTICAS.....	91
FIGURA 33. CURVAS DE DDF DE SEQUÍAS EN LLUVIAS Y ESCORRENTÍAS ANUALES DE LA PENÍNSULA IBÉRICA Y SEQUÍAS IDENTIFICADAS EN EL PERIODO 1930/31-2010/11.....	92
FIGURA 34. CARACTERIZACIÓN DE SEQUÍAS EN ESPAÑA.....	93
FIGURA 35. CURVAS DE DDF DE SEQUÍAS EN LLUVIAS Y ESCORRENTÍAS ANUALES DEL Esla EN EL DUERO Y SEQUÍAS IDENTIFICADAS EN EL PERIODO 1930/31-2010/11.....	94
FIGURA 36. CURVAS DE DDF DE SEQUÍAS EN LLUVIAS Y ESCORRENTÍAS ANUALES DE LA CABECERA DEL TAJO Y SEQUÍAS IDENTIFICADAS EN EL PERIODO 1930/31-2010/11	95
FIGURA 37. CURVAS DE DDF DE SEQUÍAS EN LLUVIAS Y ESCORRENTÍAS ANUALES EN CUENCAS DE MARGEN DERECHA DEL BAJO GUADALQUIVIR Y SEQUÍAS IDENTIFICADAS EN EL PERIODO 1930/31-2010/11.....	96
FIGURA 38. CURVAS DE DDF DE SEQUÍAS EN LLUVIAS Y ESCORRENTÍAS ANUALES EN LA CUENCA DEL SEGURA Y SEQUÍAS IDENTIFICADAS EN EL PERIODO 1930/31-2010/11	97
FIGURA 39. CURVAS DE DDF DE SEQUÍAS EN LLUVIAS Y ESCORRENTÍAS ANUALES DE LA CABECERA DEL EBRO Y SEQUÍAS IDENTIFICADAS EN EL PERIODO 1930/31-2010/11	98
FIGURA 40. CURVAS DE DDF DE SEQUÍAS EN LLUVIAS Y ESCORRENTÍAS ANUALES DE LAS CUENCAS INTERNAS DE CATALUÑA Y SEQUÍAS IDENTIFICADAS EN EL PERIODO 1930/31-2010/11.....	99
FIGURA 41. MODIS SINUSOIDAL TILLING SYSTEM	102
FIGURA 42. SERVICIO DE FTP Y PRODUCTOS MODIS.....	102
FIGURA 43. FORMATOS HDF, XML Y JPG QUE CONTIENEN LA INFORMACIÓN DIGITAL DE LAS IMÁGENES.....	103
FIGURA 44. SOFTWARE MODISTOOL PARA EL PROCESAMIENTO DE IMÁGENES MODIS	104



FIGURA 45. DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESAMIENTO PARA EL CÁLCULO DEL *NDDI* 105

FIGURA 46. ÍNDICE DE SEQUÍA *NDDI* PARA LA PENÍNSULA IBÉRICA-BALEARES Y CANARIAS.. 106

FIGURA 47. ÍNDICE DE SEQUÍA *NDDI* ELABORADO EN GRASS 107

FIGURA 48. *NDDI* DEL AÑO HIDROLÓGICO 2003/04. AÑO NORMAL 108

FIGURA 49. *NDDI* DEL AÑO HIDROLÓGICO 2004/05. AÑO SECO 109

FIGURA 50. CONTRASTE ENTRE LA PRECIPITACIÓN Y EL ÍNDICE *NDDI* PARA ALGUNAS REGIONES
SIEH 111

FIGURA 51. VALORES MEDIOS MENSUALES DEL ÍNDICE *NDDI* PARA ALGUNAS REGIONES SIEH
..... 111

FIGURA 52. MAPAS MEDIOS MENSUALES DEL ÍNDICE *NDDI* PARA EL PERIODO 2000-2010 ... 113

FIGURA 53. MAPAS DE DESVIACIÓN MENSUAL DEL ÍNDICE *NDDI* PARA EL AÑO HIDROLÓGICO
2004/2005 115

FIGURA 54. DIAGRAMAS DE DISPERSIÓN ENTRE LOS ÍNDICES IPE Y DESV-*NDDI* EN ALGUNAS
REGIONES SIEH 117

FIGURA 55. UMBRAL DE SEQUÍA DE DESV-*NDDI* PARA LAS REGIONES SIEH 118

FIGURA 56. SEQUÍAS DESV-*NDDI* EN ESPAÑA 119

FIGURA 57. SEQUÍAS DESV-*NDDI* EN LA REGIÓN TERA, ÓRBIGO, ESLA Y VALDERADUEY EN EL
DUERO..... 120

FIGURA 58. SEQUÍAS DESV-*NDDI* EN LA CABECERA DEL TAJO..... 120

FIGURA 59. SEQUÍAS DESV-*NDDI* EN CUENCAS DE MARGEN DERECHA EN EL BAJO
GUADALQUIVIR 120

FIGURA 60. SEQUÍAS DESV-*NDDI* EN LA CABECERA DEL SEGURA 121

FIGURA 61. SEQUÍAS DESV-*NDDI* EN LA CABECERA DEL EBRO 121

FIGURA 62. SEQUÍAS DESV-*NDDI* EN CUENCAS INTERNAS DE CATALUÑA 121

FIGURA 63. CURVAS DE REFLECTIVIDAD..... 123

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. DEFINICIONES DE SEQUÍA.....	6
TABLA 2. FÓRMULAS NO PARAMÉTRICAS DE PROBABILIDAD.....	16
TABLA 3. CARÁCTER DE LA SEQUÍA EN FUNCIÓN DEL VALOR DEL ÍNDICE ESTANDARIZADO Z.....	18
TABLA 4. INDICADORES DE SEQUÍA POR ESTANDARIZACIÓN.....	18
TABLA 5. CARÁCTER DE LA SEQUÍA EN FUNCIÓN DEL VALOR DEL ÍNDICE <i>EDI</i>	19
TABLA 6. CARÁCTER DE LA SEQUÍA ESTACIONAL EN FUNCIÓN DEL VALOR DEL ÍNDICE <i>EDI</i>	20
TABLA 7. CLASIFICACIÓN DEL ÍNDICE <i>IPE</i>	22
TABLA 8. ÍNDICE DE PALMER <i>PDSI</i>	23
TABLA 9. CLASIFICACIÓN DE <i>SWSI</i> Y DEL <i>RDI</i>	30
TABLA 10. PESOS APLICADOS A LAS PRECIPITACIONES DEL ÍNDICE <i>PAI</i>	32
TABLA 11. ÍNDICE <i>PAI</i>	33
TABLA 12. ÍNDICE <i>AHP</i>	33
TABLA 13. SÍNTESIS SOBRE LOS INDICADORES DE SEQUÍA.....	34
TABLA 14. LONGITUD DE ONDA Y BANDAS DE SENSORES LANDSAT TM, MERIS, MODIS Y AVHRR.....	38
TABLA 15. ESTADO DE LA VEGETACIÓN EN FUNCIÓN DE <i>SVI</i>	41
TABLA 16. RESUMEN DE LOS INDICADORES BASADOS EN TELEDETECCIÓN.....	50
TABLA 17. ESTADÍSTICOS DE LAS SERIES ANUALES DE PRECIPITACIÓN REGIONAL. 1930/31-2010/11.....	57
TABLA 18. ESTADÍSTICOS DE LAS SERIES ANUALES DE ESCORRENTÍA REGIONAL. 1930/31-2010/11.....	58
TABLA 19. COEFICIENTE R^2 DE LA RELACIÓN ENTRE LLUVIA AGREGADA Y ESCORRENTÍA EN REGIONES <i>SIEH</i>	71
TABLA 20. PASO DE AGREGACIÓN INTRANUAL OPTIMIZADO EN FUNCIÓN DEL COEFICIENTE R^2	74
TABLA 21. ÓRDENES DE MODELOS <i>ARMA</i> DE LAS SERIES ANUALES DE PRECIPITACIÓN Y ESCORRENTÍA.....	89
TABLA 22. ELABORACIÓN DEL ÍNDICE <i>NDDI</i> MENSUAL.....	101
TABLA 23. DATOS UTILIZADOS PARA REPROYECTAR LAS IMÁGENES CON <i>MODISTOOL</i>	104
TABLA 24. DATOS DE UMBRAL DE SEQUÍA PARA LAS REGIONES <i>SIEH</i> A PARTIR DE <i>IPE</i> -1 ...	117

ÍNDICE DE ECUACIONES

EC. 2-1. SERIE DE DIFERENCIAS ENTRE RECURSO Y DEMANDA	9
EC. 2-2. MAGNITUD DE SEQUÍA I	10
EC. 2-3. INTENSIDAD DE SEQUÍA I	10
EC. 2-4. DÉFICIT MÁXIMO DE LA SEQUÍA I	10
EC. 2-5. MEDIA MÓVIL	10
EC. 2-6. DÉFICIT MEDIO, μ_S , Y MÁXIMO, $S_{MÁX}$	11
EC. 2-7. DURACIÓN MEDIA, μ_D , Y MÁXIMA, $D_{MÁX}$	11
EC. 2-8. PROBABILIDAD DE OCURRENCIA Y PERIODO DE RETORNO	12
EC. 2-9. RIESGO Y PERIODO DE RETORNO.....	12
EC. 2-10. PERIODO DE RETORNO DE UNA SEQUÍA CARACTERÍSTICA E DE SERIES CON DEPENDENCIA	12
EC. 2-11. PERIODO DE RETORNO DE UNA SEQUÍA CARACTERÍSTICA E DE SERIES INDEPENDIENTES	13
EC. 2-12. PROBABILIDAD DE EXCEDENCIA DE UNA SEQUÍA EN FUNCIÓN DE SU DURACIÓN Y DÉFICIT (I)	13
EC. 2-13. PROBABILIDAD DE EXCEDENCIA DE UNA SEQUÍA EN FUNCIÓN DE SU DURACIÓN Y DÉFICIT (II)	13
EC. 2-14. PERIODO DE RETORNO Y PROBABILIDAD DE EXCEDENCIA	13
EC. 2-15. ANOMALÍA RESPECTO A UN VALOR DE REFERENCIA	14
EC. 2-16. DESVIACIONES ACUMULADAS Y UNITARIAS ACUMULADAS	15
EC. 2-17. PROBABILIDAD DEL SUCESO MENOR O IGUAL A X_M	16
EC. 2-18. ÍNDICE NORMALIZADO Z	17
EC. 2-19. ÍNDICE SSMI	18
EC. 2-20. ÍNDICE SDR	19
EC. 2-21. EDI. PRECIPITACIÓN EFECTIVA EP Y FORMULACIONES ALTERNATIVAS.....	20
EC. 2-22. EDI. DESVIACIÓN DE LA PRECIPITACIÓN EFECTIVA	20
EC. 2-23. ÍNDICE EDI.....	21
EC. 2-24. IPE . TRATAMIENTO DE UNA DISTRIBUCIÓN INCOMPLETA	22
EC. 2-25. IPE . DENSIDAD DE LA DISTRIBUCIÓN GAMMA DE 2 PARÁMETROS	22
EC. 2-26. IPE . EXPRESIONES DEL AJUSTE POR MÁXIMA VEROSIMILITUD DE LA GAMMA DE 2 PARÁMETROS	23
EC. 2-27. $PDSI$. PÉRDIDAS REALES DESDE SUPERFICIE Y SUELO	24
EC. 2-28. $PDSI$. RECARGA POTENCIAL.....	24



Ec. 2-29. <i>PDSI</i> . PÉRDIDAS TOTALES.....	24
Ec. 2-30. <i>PDSI</i> . ESCORRENTÍA POTENCIAL.....	24
Ec. 2-31. <i>PDSI</i> . <i>ETR</i> Y PÉRDIDAS DE AGUA EN SUELO CON LLUVIA MAYOR QUE <i>ETP</i>	25
Ec. 2-32. <i>PDSI</i> . RECARGA DE SUPERFICIE CON LLUVIA MAYOR QUE <i>ETP</i>	25
Ec. 2-33. <i>PDSI</i> . RECARGA DE SUELO Y ESCORRENTÍA CON LLUVIA MAYOR QUE <i>ETP</i>	25
Ec. 2-34. <i>PDSI</i> . RECARGA DE SUELO Y ESCORRENTÍA CON LLUVIA MAYOR QUE <i>ETP</i>	25
Ec. 2-35. <i>PDSI</i> . RECARGA TOTAL CON LLUVIA MAYOR QUE <i>ETP</i>	25
Ec. 2-36. <i>PDSI</i> . RECARGA DE SUPERFICIE CON LLUVIA MAYOR QUE <i>ETP</i>	26
Ec. 2-37. <i>PDSI</i> . RECARGA TOTAL Y ESCORRENTÍA EN SUELO CON LLUVIA MENOR QUE <i>ETP</i> .	26
Ec. 2-38. <i>PDSI</i> . CÁLCULO DE PÉRDIDAS DE AGUA DE SUPERFICIE Y SUELO CON LLUVIA MENOR QUE <i>ETP</i>	26
Ec. 2-39. <i>PDSI</i> . PÉRDIDAS DE AGUA DE SUPERFICIE Y SUELO CON LLUVIA MENOR QUE <i>ETP</i> .	26
Ec. 2-40. <i>PDSI</i> . PÉRDIDAS DE AGUA TOTALES Y EVAPOTRANSPIRACIÓN REAL CON LLUVIA MENOR QUE <i>ETP</i>	26
Ec. 2-41. <i>PDSI</i> . COEFICIENTES DE PASO DE TÉRMINOS POTENCIALES A REALES	27
Ec. 2-42. <i>PDSI</i> . PRECIPITACIÓN CLIMATOLÓGICAMENTE APROPIADA DEL MES <i>I</i>	27
Ec. 2-43. <i>PDSI</i> . DESVIACIÓN DE LA PRECIPITACIÓN REGISTRADA.....	27
Ec. 2-44. <i>PDSI</i> . ÍNDICE DE ANOMALÍA DE HUMEDAD <i>Z</i> Y FACTOR DE PONDERACIÓN <i>K</i> DEL MES <i>J</i>	27
Ec. 2-45. <i>PDSI</i> . VALOR DE X_j	27
Ec. 2-46. <i>CMI</i> . LLENADO DEL SUELO	29
Ec. 2-47. <i>CMI</i> . DESVIACIÓN RELATIVA DE EVAPOTRANSPIRACIÓN	29
Ec. 2-48. <i>CMI</i> . ÍNDICE DEL DÉFICIT DE EVAPOTRANSPIRACIÓN	29
Ec. 2-49. <i>CMI</i> . ÍNDICE DE EXCESO DE HUMEDAD	29
Ec. 2-50. <i>CMI</i> . ÍNDICE DE EXCESO DE HUMEDAD ACTUALIZADO	29
Ec. 2-51. ÍNDICE <i>CMI</i>	29
Ec. 2-52. ÍNDICE <i>SWSI</i>	30
Ec. 2-53. ÍNDICE <i>PAI</i>	32
Ec. 2-54. <i>PAI</i> CORREGIDO.....	32
Ec. 2-55. ÍNDICE <i>AWRI</i>	33
Ec. 2-56. ÍNDICE <i>MSI</i>	38
Ec. 2-57. ÍNDICE <i>NDVI</i>	39
Ec. 2-58 EN LANDSAT TM.....	39
Ec. 2-59. EN MODIS.....	39



EC. 2-60. EN NOAA-AVHRR	39
EC. 2-61. ANOMALÍA DEL ÍNDICE <i>NDVI</i>	40
EC. 2-62. ÍNDICE SVI	41
EC. 2-63. ÍNDICE VCI	42
EC. 2-64. ÍNDICE TCI	42
EC. 2-65. ÍNDICE VH,	42
EC. 2-66. ÍNDICE <i>SAVI</i>	43
EC. 2-67. ÍNDICE <i>NDWI</i>	43
EC. 2-68. EN LANDSAT TM	43
EC. 2-69 EN MODIS	43
EC. 2-70. ANOMALÍA DEL ÍNDICE <i>NDWI</i>	43
EC. 2-71. ÍNDICE <i>NDVID</i>	44
EC. 2-72. ÍNDICE <i>VDI</i>	44
EC. 2-73. ÍNDICE <i>WDI</i>	44
EC. 2-74. PARÁMETROS DE BORDE EN <i>WDI</i>	45
EC. 2-75. ÍNDICE <i>TVDI</i>	45
EC. 2-76. ÍNDICE <i>VTCI</i>	46
EC. 2-77. ÍNDICE <i>VCWI</i>	46
EC. 2-78. ÍNDICE <i>NDDI</i>	46
EC. 2-79. ÍNDICE <i>NDDI</i> ESCALADO	46
EC. 2-80. ÍNDICE <i>NSDI</i>	47
EC. 2-81. ÍNDICE <i>EVI</i>	47
EC. 2-82. ÍNDICES <i>VCEI</i>	48
EC. 2-83. ÍNDICE <i>NDDEI</i>	48
EC. 3-1. DESVIACIONES DEL <i>NDDI</i>	112

1 ANTECEDENTES

El presente informe, “*Caracterización Hidrológica de Sequías*”, describe parte de los trabajos realizados en la actividad contemplada en la ficha número 4 para la *Elaboración y mantenimiento de un sistema de indicadores hidrológicos y estudios para la identificación y caracterización de sequías del Acuerdo para encomienda de gestión por el Ministerio de Medio Ambiente (Dirección General del Agua) al Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX), del Ministerio de Fomento, para la realización de asistencia técnica, investigación y desarrollo tecnológico en materias competencia de la Dirección General del Agua (2007-2011)*, resolución de 22 de noviembre de 2007 y publicación en BOE (nº 287) el viernes 30 noviembre 2007.

En el presente informe se describe el estado del arte de los índices de sequía y se evalúa un conjunto de ellos aplicándolos a España y a distintas fases del ciclo hidrológico para su consideración en los sistemas de indicadores del estado hidrológico. Los índices estimados se han obtenido de variables hidrológicas como la precipitación, la escorrentía o la reflectividad de la imagen de satélite que estaría relacionada con la humedad del medio.

La utilidad de los índices de sequía debe considerarse en función de su capacidad descriptiva y predictiva. Deben ser capaces de caracterizar una sequía y describir suficientemente elementos como su intensidad o su duración. Si esto se cumple, es posible estimar la frecuencia y peligrosidad de una sequía, facilitando la consiguiente determinación de niveles de riesgo. Por otro lado, la secuencia de procesos del ciclo hidrológico, desde la aparición de la lluvia hasta la generación de escorrentía, hace que en función de las características hidrodinámicas del medio existan distintas estrategias predictivas. Una línea de trabajo no abordada en el presente informe se refiere a la implementación de previsiones de lluvia estacional que a su vez mejoren la capacidad de respuesta ante una sequía.

Al presente informe le acompaña otro centrado en la organización de un Sistema de Indicadores del Estado Hidrológico en España cuyo título es “*El Sistema de Indicadores de Estado Hidrológico, SIEH*” realizado como parte de las actuaciones de la ficha nº4 de la mencionada encomienda de gestión. Los indicadores que forman parte del SIEH ofrecen información actualizada sobre el estado hidrológico con periodicidad mensual, estacional o anual. Se basan en comparativas de evolución y mapas elaborados sobre variables registradas como la precipitación, el caudal, las reservas en los embalses, la piezometría o las reservas de nieve. Las series registradas fueron seleccionadas de acuerdo a su idoneidad para describir situaciones de sequía, la disponibilidad de los registros en plazos de tiempo reducidos y otras consideraciones técnicas de la Dirección General del Agua, DGA. Algunos elementos de este sistema como es la regionalización hidrológica del SIEH han sido directamente utilizados en los trabajos del presente informe.

Otra actuación desarrollada para la misma encomienda de gestión se refiere a la elaboración de un catálogo de sequías históricas mediante la recopilación de eventos identificados por la aplicación de modelos de sequías a series derivadas del análisis dendrocronológico en España y a la recopilación de datos y publicaciones sobre sequías ocurridas en periodos anteriores al año 1940/41. Dada la escasez de eventos



secos en el periodo de planificación, esta recopilación de datos históricos supone una línea de trabajo futuro en cuanto aporta datos para mejorar la parametrización de las funciones de distribución que representan la frecuencia de las sequías descritas en el presente informe.

El presente informe contiene dos grandes capítulos además de los dedicados a las conclusiones (capítulo 4) y referencias bibliográficas (capítulo 6). El primero de ellos (capítulo 2) se dedica a las definiciones de sequía y a la recopilación del estado del arte sobre los índices de sequía. Como punto de partida, se describe el modelo de rachas y el conjunto de variables aleatorias que permiten caracterizar una sequía. A continuación, se recopila un conjunto de índices elaborados a partir de transformaciones de series hidrológicas o ponderaciones de datos para identificar sequías una vez que las condiciones excepcionalmente secas se han establecido. Concluye este capítulo con la recopilación de indicadores derivados de la teledetección.

El siguiente capítulo del informe (capítulo 3) se dedica al desarrollo práctico en España de los elementos básicos de los índices anteriormente recopilados. Se han elaborado por tanto, series de muestras de sequías históricas acaecidas durante el periodo de planificación hidrológica. Para ello, se han usado modelos de rachas en series regionales de precipitación y escorrentía y se han asignado periodos de retorno a las sequías para permitir una ordenación en términos de peligrosidad, generando curvas regionales de Duración-Déficit-Frecuencia, DDF. El interés inmediato de estas curvas es la caracterización de sequías en curso y la selección de medidas de mitigación. Se han elaborado también series del índice de precipitación estandarizada, IPE, en varios pasos temporales para, a partir de la lluvia registrada, estimar series representativas de la escorrentía y aportación. En último lugar, se han tratado e interpretado imágenes de satélite para implementar el índice NDDI, Normalized Difference Drought Index, o índice de sequía de diferencia normalizada desarrollado en el National Drought Mitigation Center, adaptado en este informe a las desviaciones mensuales, Desv-NDDI.

En los anejos del informe se incluyen los valores de los parámetros y resultados de los estudios anteriores en cada una de las regiones del SIEH en las que se ha dividido España. También, alguno de los programas utilizados para la descarga de las imágenes de satélite. Las herramientas informáticas de cálculo utilizadas para el conjunto de trabajos han sido el SIG GRASS (GRASS Development Team, 2008), ArcGIS versión 9.3 (ESRI, 2011), el paquete R para el tratamiento y programación estadística R (R Development Core Team, 2008) y los de tratamiento de imágenes de teledetección MODISTool (EROS, 2011) y ENVI v4.3 (EXELISVIS, 2006).

2 SEQUIÁS

2.1 DEFINICIONES

Las sequías son fenómenos naturales, recurrentes y anormales, caracterizados por la escasez temporal y persistente de agua en sectores dependientes del recurso de una región. Esta definición hace referencia a varios elementos básicos para que una sequía suceda en un territorio o en una región: la rareza del fenómeno o probabilidad extrema de ocurrencia, su carácter natural, su persistencia y duración y el déficit característico para que provoquen impactos negativos. Conceptual y operativamente el análisis de estos factores se hace más complejo cuando surgen cuestiones sobre la fase del ciclo y el tipo de régimen hidrológico de interés, natural o alterado de aportaciones, o los impactos y elementos de vulnerabilidad y sectores de producción afectados por la escasez de agua (Wilhite, 2011; Smakhtin y Hughes, 2004; van Lanen y Tallaksen, 2004; Dracup et al., 1980).

El ciclo hidrológico es una sucesión de procesos por los que circula el agua. En el origen de una sequía señalan a la lluvia como factor desencadenante. Pereira y Paulo (2004) definen sequía como un déficit temporal de la disponibilidad de agua, de causa natural, originado por lluvias persistentemente inferiores a la media, cuya frecuencia, duración e intensidad son variables y difícilmente predecibles, cuya consecuencia es la disminución del recurso hídrico e impactos en los ecosistemas. Estos autores también recogen la definición de Dracup et al. (1980) según los cuales, la sequía es un déficit de lluvia suficientemente intenso y persistente para afectar negativamente a los ecosistemas de una región y reducir la reserva de agua para usos de agua domésticos o energéticos, especialmente en aquellas regiones en las que la lluvia es el principal origen del recurso.

La circulación de agua depende de las características hidrodinámicas del medio y de las operaciones de gestión y uso del recurso. En cada fase de esta sucesión la disponibilidad de agua se define de distinta manera, lo que hace diferente el tratamiento de las sequías desde un punto de vista climático, centrado en la lluvia o temperatura, hidrológico cuando el interés se centra en la infiltración al suelo o al acuífero, la generación de escorrentía, la gestión y regulación del recurso hídrico o económico y social si el interés se centra en los impactos producidos por la dependencia de una producción respecto al consumo de agua.

Wilhite (1993, 2001 y 2006) destaca al definir las sequías el que se trata de un fenómeno acumulativo, que se dilata durante largos periodos temporales sin que su inicio, final y límites regionales sean evidentes. Sus impactos son, además, difícilmente cuantificables ya que no son, con carácter general, estructurales y se dan en diferentes sectores. Desde un punto de vista socioeconómico, Maunder (1990) describe secuencias de propagación de impactos desde sistemas agrícolas a escala local a través de otras regionales, nacionales e incluso mundiales con efecto en políticas de precios, salud, emigración, inflación o conflictos sociales y concluir la dificultad de la identificación y evaluación de sequías.

Desde un punto de vista hidrometeorológico se ha venido distinguiendo entre sequías meteorológicas, agronómicas, hidrogeológicas, hidrológicas, del sistema de explotación o, por sus efectos en otros sectores, sociales y económicas (Mishra y Singh, 2010;

Smakhtin y Hughes, 2004; Tallaksen y van Lanen, 2004; Heim, 2002; Figura 1). En esta secuencia hidrológica se mantiene la relación causa efecto con el origen de la sequía en la sequía meteorológica y el déficit de lluvia a que da lugar una persistencia de sistemas de alta presión que inducen bajas o nulas precipitaciones, acompañadas o no de altas temperaturas, velocidades del viento y radiación que, a su vez, incrementan las tasas de evapotranspiración. Sin embargo, la definición de sequía se complica al surgir elementos de vulnerabilidad y dar mayor peso a los elementos que reciben el impacto. Así, desde un punto de vista agronómico, un déficit de corta duración, pero con impacto serio en el crecimiento de la planta pasa a denominarse sequía.

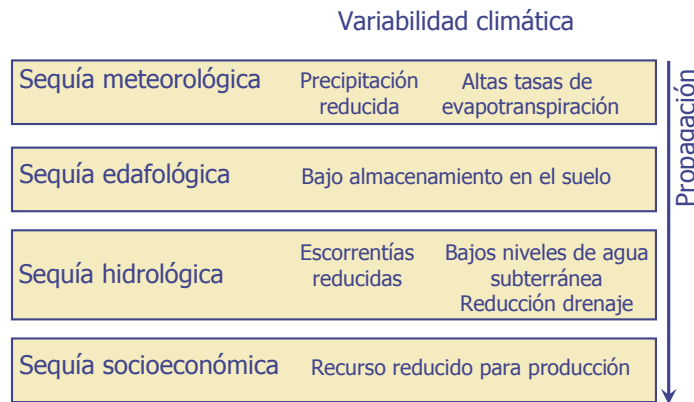


Figura 1. Tipos de sequías y propagación

En el extremo opuesto se encontraría la denominada sequía socioeconómica, caracterizada por los elementos vulnerables e impactos en los sectores dependientes del recurso hídrico: abastecimiento, producción industrial o ecosistemas naturales dependientes del recurso entre otros. Este tipo de sequía se produce por la propagación de un déficit de lluvia o de recurso y el fallo en el sistema de regulación de los recursos hídricos para abastecer la demanda de un bien económico o social con un impacto negativo (Mishra y Singh, 2010; van Lanen y Tallaksen, 2004).

En el contexto del régimen real de los ríos, la sequía hidrológica se produce cuando los recursos hídricos del sistema de explotación no son suficientes para proveer las demandas. A diferencia de la sequía socioeconómica, el foco está en el agua y en el insuficiente recurso hídrico para satisfacer las demandas. Esta descripción se adapta al contexto de un régimen natural para definir una sequía hidrológica como la racha en la que el recurso hídrico natural no alcanza un umbral mínimo al reducirse la escorrentía superficial y recarga, con disminución de niveles y de la descarga subterránea.

Otro factor que frecuentemente aparece en la bibliografía es la definición de sequía subterránea o hidrogeológica al centrar el interés en la componente subterránea del ciclo hidrológico y en la reducción de niveles piezométricos. Los impactos derivados se reflejan en impactos de sistemas dependientes de los niveles como puede ser un recurso hídrico (sequía hidrológica) o un nivel ecológico (sequía ecológica). La señal de una sequía hidrogeológica depende de las características hidrodinámicas del medio pudiendo dar una respuesta rápida en la que es fácilmente identificable la reducción de niveles o mucho más lenta y atenuada dependiente de un extenso historial de actividad sobre el acuífero, lo que complica su identificación (Peters et al, 2006; Hisdal et al., 1999).

Al disminuir la precipitación, disminuye el agua de los suelos afectando a la vegetación, con aumento del estrés hídrico y reducción de la biomasa. Se habla entonces de la sequía edafológica. Está evidentemente relacionada con el impacto en la agricultura por lo que si se incide en este aspecto, se pasa a hablar de sequía agrícola. El elemento clave es entonces la vulnerabilidad del cultivo, mayor en condiciones de secano, con cultivos altamente consumidores y suelos de escasa capacidad de mantenimiento de humedad (Sivakumar et al., 2011; Wilhelmi y Wilhite, 2002).

La planificación hidrológica estudia las posibilidades de uso del sistema hidráulico para disminuir el impacto de la escasez de recurso y satisfacer en la medida de lo posible las demandas. Para ello, se combina el conocimiento del recurso natural, con las demandas, la infraestructura hidráulica o las posibilidades de uso conjunto de los acuíferos para minimizar los valores esperados de los fallos del sistema o resolverlos. La caracterización de los fallos del sistema hidráulico se basa en conceptos como la garantía, resiliencia y vulnerabilidad. A su vez, estos términos pueden considerarse equivalentes a otros manejados en la caracterización de los déficit de recurso en las series temporales, como son los de frecuencia, severidad, duración e intensidad de las sequías (Sánchez et al., 2000).

La garantía de un sistema se define como el porcentaje de tiempo en que el sistema se mantiene sin fallos y equivaldría a la frecuencia o probabilidad de servicio seguro (Estrada, 1994). En términos de demanda se definiría como la tasa que no se puede abastecer durante un periodo. La resiliencia es la tasa con la que el sistema se puede recuperar una vez se ha producido un fallo y equivale a su vez a la inversa del periodo medio de duración de las sequías. Por último, la vulnerabilidad hidráulica está relacionada con la severidad o déficit provocado por la sequía. Índices de vulnerabilidad son los valores medios del máximo déficit alcanzado en cada sequía o el máximo ocurrido.

En planificación se trabaja con series históricas que permiten analizar el estado del sistema en términos de valores esperados y planificar una serie de medidas correctoras. Los eventos secos ya están incluidos en la serie y provocan una serie de situaciones críticas en los diferentes estudios que atenúan las medidas correctoras. Cubillo (1994 y 2001) destaca las siguientes opciones:

1. Modificaciones de la demanda y de su gestión, tanto a largo como a corto plazo, con acciones tendentes a la reducción de la vulnerabilidad del sistema y otras coyunturales a usar en sequía
2. Prever la movilización de recursos complementarios
3. Planificar las reglas de gestión a aplicar en situaciones de excepción

Lógicamente, las conclusiones de estos estudios dependen de las situaciones históricas registradas y de la integración de nuevos datos conforme las series se hacen más extensas con nuevos eventos secos. Es el caso de la consideración de la sequía de la primera mitad de los 90 en España en los estudios hidráulicos del LBAE (MAGRAMA, 2000b) y subsiguiente documentación del Plan Hidrológico Nacional (MAGRAMA, 2000a).



La característica indefinición de los aspectos anteriormente mencionados como la probabilidad que caracteriza un fenómeno extremo dependiente a su vez de la duración y del déficit que ocurre en una región, las particularidades de cada variable del ciclo hidrológico o de los elementos vulnerables y la cuantía del impacto, provoca que exista una dificultad para definir en la práctica la situación de sequía. En Wilhite (2011) la sequía es un periodo con déficit respecto a valores normales. Es prolongado con una duración mínima de al menos una estación climática. Es usual además referirse a las sequías cuando es la precipitación la que no alcanza los valores normales ya que un déficit de lluvia suele ser la causa de un déficit en otras fases del ciclo hidrológico.

Las definiciones prácticas de sequía necesitan cuantificar estos aspectos que inicialmente dependen de factores locales y de criterios científicos o técnicos variables de una región a otra y de un momento a otro. La Tabla 1 presenta algunas definiciones históricas recopiladas por diferentes autores (Mishra y Singh, 2010; Heim, 2002; Marcos Valiente, 2001; McKee et al., 1995 y 1993; Heras, 1973). Tienen en común el depender mayoritariamente de la lluvia y el fijar dos tipos de umbrales, el del valor anómalamente bajo y el de la duración o persistencia. También son de interés los índices meteorológicos y el interés por el impacto agrícola.

Tabla 1. Definiciones de sequía

Referencia	Concepto	Definición	Región
U.S. Weather Bureau y Tennessee Valley Authority	Lluvia y persistencia	Periodo de 21 días o más con lluvia inferior en al menos un 30% respecto a la normal	EE.UU.
Heim, 2002	Lluvia y persistencia	15 días consecutivos sin lluvia	
	Lluvia	Precipitación anual menor al 75% de la normal	
	Lluvia relativa	Precipitación mensual inferior al 65% de la normal	
	Lluvia	Precipitación inferior al 85% de la normal	
Van Bavel y Verlinden, 1956; Heim, 2002	Humedad del suelo	Número de días con humedad disponible en el suelo nula	
Vysotsky (1905)	Lluvia y ETP	Índice cociente P/ETP. Umbral de sequía variable en función del uso y clima. Bosque húmedo (4/3); bosque de transición (1); estepa moderadamente seca (2/3); estepa meridional seca (1/3)	Antigua URSS
Bova (1941)	Lluvia, temperatura y humedad en el suelo	Índice de sequía mayor que 1,5. Es función de la humedad en el suelo (mm) con valor máximo 100 mm, suma de temperatura (°C) mayores a 10°C y lluvia de primavera antes de la sequía	Antigua URSS
Ivanov (1948)	Lluvia y ETP función de la temperatura (T en °C) y humedad relativa media mensual (h_r)	$ETP = 0,0018(25 + T)^2 \cdot (100 - h_r)$ Índice cociente P/ETP. Umbral de sequía 0,6	Antigua URSS
Kulik (1958)	Humedad en el suelo y persistencia	Periodo de más de 10 días con humedad en el suelo inferior a 20 mm es inicio de sequía o semisequía; sequía cuando es inferior a 10 mm	Antigua URSS
Linseley et al., 1959	Lluvia y persistencia	Periodo mantenido con lluvias no significativas	



Referencia	Concepto	Definición	Región
Ramdas, 1960	Cantidad y duración de lluvia	Situación en la que la precipitación estacional anual es deficiente en al menos 2 veces la desviación típica	India
Gumbel, 1963	Aportación	Menor valor anual de caudal medio diario	
Hudson y Hazen, 1964	Cantidad de lluvia	precipitación anual inferior a 180 mm	Libia
Hudson y Hazen, 1964	Duración	periodo de 6 días sin lluvias	Bali, Indonesia
Palmer, 1965	Indicador de humedad en el suelo y duración	intervalo de tiempo, generalmente con una duración del orden de meses o años, durante el cual el aporte de humedad en un determinado lugar cae consistentemente por debajo de lo climatológicamente esperado	
Russell, 1970	Cantidad y duración de lluvia	falta prolongada de precipitación, inferior a la media	
Dhar, 1979	Cantidad de lluvia	inferior al 80% de la lluvia normal	India
Baldwin Wiseman	Cantidad y duración de lluvia	intervalo de 3 meses o más con una precipitación inferior al 50% de la media normal	
OMM ¹	Cantidad y duración de lluvia	secuencia atmosférica caracterizada por el desarrollo de precipitaciones inferiores al 60% de las normales durante más de dos años consecutivos	
Krishnan, 1979	Cantidad y duración de lluvia	periodo de 10 días con lluvia total inferior a 5 mm	URSS
SUDENE ² , 1981	Cantidad, duración y momento en el que se produce	precipitaciones mensuales durante el periodo lluvioso inferiores a 100 mm o inferiores al 80% de la media a lo largo de 90 días, durante los cuales se producen intervalos superiores a 10 días con valores inferiores a 10 mm	Noreste de Brasil
FAO, 1983	Humedad en el suelo	porcentaje de años en los que los cultivos se arruinan por déficit de humedad	
Goudie ³ , 1985	Cantidad y duración de lluvia	periodo de al menos 15 días consecutivos con precipitación diaria inferior a 0,25 mm	Gran Bretaña
OMM, 1986	Precipitación reducida y persistente	déficit de precipitación mantenido y duradero	
Rind, 1990	Precipitación y evapotranspiración potencial	la condición resultante de un exceso de demanda atmosférica de humedad respecto a su aporte, es decir, con evapotranspiración potencial mayor que la precipitación	
UN ⁴ , 1994	Lluvia, propagación y producción	fenómeno natural caracterizado por niveles de lluvia significativamente inferiores a los normales causante de desequilibrios hidrológicos que afectan a la producción	
McKee et. al, 1993 y 1995	Índice de precipitación	periodo comprendido desde el momento en que el índice alcanza un valor equivalente a	

¹ Organización Meteorológica Mundial

² Agencia para el desarrollo del noreste del Brasil

³ British Rainfall Organization

⁴ Convención contra la Sequía y Desertificación



Referencia	Concepto	Definición	Región
	estandarizada	aproximadamente la frecuencia 85% en la serie hasta volver a registrar valores por encima de la media	
Schneider ⁵ , 1996	Lluvias regionales	periodo suficientemente extenso, de duración estacional a varios años, con déficit de lluvias regionales respecto al estadístico estimado de series multianuales	
VV.AA. Marcos Valiente, 2001; Olcina Cantos, 2001, Morales Gil et al., 2000	Lluvias regionales o registradas	- Año seco: curso anual con precipitación total inferior al 60% de la media normal calculada con una serie de al menos 30 años - Indigencia pluviométrica: mantenimiento de condiciones secas por más de un año - Sequía: precipitación inferior en un 50%, 40% ó 60%, según autores y zonas de estudio, respecto a la media normal durante más de dos años consecutivos.	España conforme a criterios de la OMM

La identificación operacional de una sequía se ha basado tradicionalmente en el uso de series de lluvia y en la detección de valores anómalamente reducidos y persistentes. La lluvia tiene la ventaja respecto a otras series hidrometeorológicas de su facilidad de registro con medidores terrestres. Cabría en todo caso plantear los problemas de calidad de los registros, el que las series sean suficientemente largas y el de su representatividad regional. Otras variables como el caudal de un río, aunque de registro prácticamente directo, involucran procesos hidrológicos más complejos y dificultan la identificación de sequías. La humedad en el suelo es particularmente importante al provocar la sequía de la producción agrícola. Para su consideración se hubo de recurrir a variables estimadas mediante modelos.

En la propagación por el ciclo hidrológico se modifican las propiedades de las sequías. Conceptualmente se ha venido representando el ciclo hidrológico como una secuencia de almacenamientos y transferencias de agua entre ellos. Así, en los modelos de recursos hídricos es normal trabajar al menos con los almacenamientos del suelo y del acuífero. Cabe esperar que en cada proceso del ciclo hidrológico deba considerarse cuándo se produce el influjo de agua, el almacenamiento y las propiedades de la descarga de agua. Respecto a la precipitación, se producirá un retardo en la entrada de agua y se filtrarán los valores extremos a medida que se reparte el recurso entre diferentes procesos y se laminan los influjos en cada almacenamiento. Dadas estas condiciones, en la propagación por el ciclo hidrológico, el número de sequías se hace menor, aunque su duración mayor (Van Loon et al., 2012). El cambio en las propiedades de las sequías puede ser pronunciado e incluso desconectarse entre diferentes procesos, por ejemplo entre la lluvia y el recurso almacenado en acuíferos, si la precipitación se concentra con altas intensidades en cortos intervalos de tiempo generando alta escorrentía directa con reducidas tasas de recarga.

El desarrollo de sistemas de información basados en la teledetección ha permitido ampliar la metodología anterior mediante la incorporación de imágenes e índices susceptibles de ser utilizados para identificar estos casos de sequía. Un aspecto clave

⁵ Encyclopedia of climate and weather

en este sentido es la respuesta que dan el agua y la clorofila en determinados intervalos del espectro electromagnético. Su perspectiva es sinóptica y abarca grandes extensiones del territorio, reduciendo la dependencia a las técnicas aplicadas para regionalizar una variable como por ejemplo la precipitación.

La Tabla 1 contiene una muestra de un conjunto amplio de definiciones de sequía basadas en variables e índices con un objetivo práctico como es el de la puesta en marcha de estrategias de mitigación de impactos o el análisis de los eventos históricos. Los índices de sequía son indicadores del estado del agua en cualquiera de las fases del ciclo hidrológico. Siendo su objetivo final la descripción y el análisis de situaciones de sequía, se elaboran utilizando explícitamente alguna de las consideraciones generales anteriores. Como mínimo describen la evolución de una variable hidrológica e identifican una sequía al fijar unos niveles de inicio y fin de sequía asociados a una frecuencia de ocurrencia suficientemente reducida. Permiten el análisis de variables derivadas como la duración e intensidad del déficit (Mishra y Singh, 2010; van Lanen y Tallaksen, 2004).

Los sistemas de indicadores se implementan de acuerdo a la combinación de varios de estos indicadores para realizar un seguimiento del estado de diversos procesos hidrológicos y describir los impactos de una sequía, incorporando medidas correctoras de acuerdo a niveles fijados en función de criterios de mitigación y prevención. La combinación de esta información se realiza con diferentes criterios y objetivos como son los que relacionan el estado hidrológico con el efecto económico o social.

2.2 PARÁMETROS Y VARIABLES ALEATORIAS

En el análisis estadístico de series temporales se define una racha de una serie temporal como la secuencia continua de valores inferiores (superiores) a un umbral fijado. Una variable aleatoria de una serie temporal, es decir, registrada con un índice de orden temporal está caracterizada por su distribución de frecuencias. A su vez, ésta depende de una serie de estadísticos como la media, la desviación típica, el coeficiente de sesgo, el primer coeficiente de autocorrelación y, en sequías, las propiedades de las rachas resultantes del establecimiento de un umbral respecto a la duración y valor asociado a una frecuencia (Gottschalk, 2004). Racha es la secuencia de observaciones de la misma clase precedidas y sucedidas por observaciones de clase diferente siendo el número de observaciones consecutivas de la misma clase la longitud de la racha (Pereira y Paulo, 2004; Estrada, 1996). En Yevjevich (1983), las sequías se definen utilizando una variable aleatoria diferencia de otras dos variables relacionadas con el recurso y la demanda:

Ec. 2-1. Serie de diferencias entre recurso y demanda

$$y_j = x_j - d_j$$

donde x_j es el recurso y d_j la demanda en el momento j . La identificación de los periodos de sequía en un modelo como el anterior asume inicialmente como umbrales de entrada y recuperación de la sequía los correspondientes al valor nulo de la variable y . Una sequía es entonces la secuencia de periodos con valores negativos y son variables asociadas a cada sequía la duración de la racha, la severidad o el déficit



acumulado respecto al valor nulo, la intensidad o el déficit medio como cociente del déficit acumulado entre la duración y el déficit máximo alcanzado.

La dificultad de uso de un modelo como el anterior reside en la falta de información sobre el recurso y la demanda. Sin embargo, el modelo de rachas se usa sobre la serie de recursos considerando como umbrales de entrada y recuperación de la sequía un cuantil de la serie de caudales que se establecen conforme a diversas consideraciones en función de la demanda o de la capacidad de regulación del sistema y de otros factores regionales. Inicialmente, se toma como umbrales de entrada y recuperación el valor medio de la serie temporal. Para el umbral de inicio también se toman percentiles bajos, entre el 90% y 70% de la curva de valores clasificados (Hisdal et al., 1999), con la intención de identificar eventos de baja frecuencia de ocurrencia. Cuando se considera la estacionalidad de lluvias, el umbral es también estacional de series con o sin ventana móvil. Dada la serie y_j , se definen (Mishra y Singh, 2010; Pereira y Paulo, 2004; Tallaksen et al., 1997; Estrada, 1996; Yevjevich, 1983; Dracup et al., 1980a)

- Duración de una sequía i , desde el momento de su inicio hasta el del final, d_i
- Severidad o déficit de cada paso temporal, y_j
- Magnitud o el déficit acumulado de la sequía i

Ec. 2-2. Magnitud de sequía i

$$s_i = \sum_{\forall j \in \text{sequía } i} y_j$$

- Intensidad o déficit medio de una sequía, cociente entre el déficit total acumulado entre el inicio y fin y la duración

Ec. 2-3. Intensidad de sequía i

$$i_i = \frac{s_i}{d_i}$$

- Severidad o déficit máximo alcanzado en un paso temporal de la sequía i

Ec. 2-4. Déficit máximo de la sequía i

$$s_{\text{máx } i} = \text{máx}_{\forall j \in \text{sequía } i} (y_j)$$

Los modelos de rachas topan con el problema de la sucesión de cortos periodos húmedos entre otros de escasez que deriva en la identificación de sequías cortas, fragmentadas y dependientes (Tallaksen et al., 1997). Una solución que suaviza este efecto consiste en el uso de medias móviles de orden k que se comparan con el valor umbral de inicio de sequía y el valor de referencia para contabilizar déficit.

Ec. 2-5. Media móvil

$$z_t^k = \frac{1}{k} \cdot \sum_{i=t}^{t+k-1} x_i$$

Siendo z_t^k la serie de medias móviles de orden k en el instante t y x_i la serie original. El paso u orden de las medias móviles aplicado sobre series de precipitación permite representar otras fases del ciclo hidrológico cuya respuesta está desfasada o regulada

durante un periodo de tiempo equivalente a este paso. Los valores habituales oscilan entre 3 y 12 meses (Menéndez, 1995).

También se establecen criterios de recuperación que valoren el superávit generado frente al déficit acumulado. El criterio de recuperación de un volumen del déficit acumulado identifica el final de la sequía cuando el superávit acumulado alcanza al menos un porcentaje del déficit total acumulado. Este porcentaje se denomina parámetro crítico y representaría una condición de recuperación del sistema para recuperar un funcionamiento normal (Tallaksen et al., 1997).

Estas técnicas filtran los intervalos húmedos y las sequías se agregan, aunque no se define con precisión el principio y el final de la sequía. La parametrización de umbrales de entrada, recuperación, parámetro crítico u orden de las medias móviles se puede realizar utilizando los siguientes estadísticos y comprobando su variabilidad en función de los parámetros anteriores (Álvarez-Rodríguez y Estrela, 2003 y 2000):

- Número de sequías identificadas, nd . Esta variable está relacionada con el grado de agrupamiento entre sequías menores
- Déficit máximo y medio. Los déficits se definen como el valor acumulado mensual de cada sequía, s_i . El valor máximo facilita la parametrización del modelo y la caracterización de las sequías en una región. El valor medio se obtiene dividiendo la suma total de déficit por el número total de sequías identificadas

Ec. 2-6. Déficit medio, μ_s , y máximo, $s_{m\acute{a}x}$

$$\mu_s = \frac{\sum_{i=1}^{nd} s_i}{nd} \quad s_{m\acute{a}x} = \text{m\acute{a}x}(s_i)$$

- Duración máxima y media. La duración, d_i , se define como el tiempo que dura una sequía desde su inicio hasta la recuperación del porcentaje de déficit sobre la media. El momento de recuperación depende del valor dado al parámetro crítico, cuya calibración depende también de las duraciones máximas identificadas. Es decir, este parámetro ha de ser consistente con la necesidad de agrupar sequías menores y no generar sequías excesivamente largas. El valor medio de la duración se obtiene dividiendo la suma de duraciones identificadas por el número total de sequías

Ec. 2-7. Duración media, μ_d , y máxima, $d_{m\acute{a}x}$

$$\mu_d = \frac{\sum_{i=1}^{nd} d_i}{nd} \quad d_{m\acute{a}x} = \text{m\acute{a}x}(d_i)$$

Los factores de persistencia espacial y temporal también caracterizan la sequía. Se consideran como escalas mínimas las mensuales o estacionales, 2 o 3 meses, para entender que una sequía se ha iniciado. De manera similar se trataría la continuidad espacial de los déficit y en la bibliografía se pueden encontrar indicaciones sobre el área mínima en condiciones secas, entre 10.000 y 100.000 km² (Tallaksen y van Lanen, 2004; Dracup et al., 1980b).



2.3 PERIODO DE RETORNO Y SEQUÍAS

El concepto de periodo de retorno se ha utilizado en hidrología para describir la frecuencia de fenómenos extremos e, incluso, el riesgo de exposición a un evento de este tipo durante un periodo de tiempo. Si el periodo de retorno se define como el periodo medio entre eventos independientes de magnitud superior a uno dado, Q_0 , la probabilidad de que ocurra ese, $P(Q > Q_0)$, es la siguiente:

Ec. 2-8. Probabilidad de ocurrencia y periodo de retorno

$$P(Q \leq Q_0) = \frac{1}{T} \Rightarrow P(Q > Q_0) = 1 - \frac{1}{T}$$

asumiendo como constante esta probabilidad y el nº de datos de la muestra igual al de años. El riesgo de presentación de este evento superior a uno dado Q_0 en n años es (Chow et al., 1988),

Ec. 2-9. Riesgo y periodo de retorno

$$R = 1 - \left(1 - \frac{1}{T}\right)^n$$

Las definiciones anteriores se emplean con eventos como las crecidas anuales y su uso en sequías no es inmediato. Una sequía en una región se caracteriza al menos mediante la duración y el déficit, medio o el acumulado, respecto a un umbral (Dracup et al., 1980b). Las funciones de distribución son por tanto y como mínimo bivariadas lo que hace que las series sean cortas para el ajuste de parámetros. La consideración de la duración afecta además al conteo del número de ensayos que, en el caso de los estudios de máximos anuales, se consideraba igual al número de años. Las sequías se identifican con carácter plurianual sobre series hidrometeorológicas en las que además surgen dudas sobre el mantenimiento de la hipótesis de independencia, especialmente si se seleccionan los registros mínimos.

El periodo de retorno se puede redefinir y apoyar en el periodo de interarribo medio entre eventos críticos. Como tiempo de interarribo se considera el transcurrido entre el inicio de una sequía y el inicio de la siguiente (Mishra y Singh, 2010 y 2011; Salas et al., 2005; Shiau y Shen, 2001; Chung y Salas, 2000; Fernández y Salas 1999a y 1999b Loaiciga y Mariño, 1991).

Considerando que el periodo de retorno T de una sequía característica E , de duración D_0 y déficit mayor o igual que S_0 , es el producto del valor esperado del número de sequías dado en un periodo de tiempo y del periodo de interarribo entre sequías, no necesariamente caracterizadas por E , queda la siguiente ecuación para estimar T (Salas et al., 2005; Shiau y Shen, 2001),

Ec. 2-10. Periodo de retorno de una sequía característica E de series con dependencia

$$T = \frac{p_{01} + p_{10}}{p_{01} \cdot p_{10}} \cdot \frac{1}{P(E)} = \frac{p_{01} + p_{10}}{p_{01} \cdot p_{10}} \cdot \frac{1}{P(S > S_0, D = D_0)}$$

siendo p_{01} la probabilidad de pasar de una situación de sequía (0) a otra sin sequía (1) y p_{10} de sin sequía a otra con sequía. Si la variable es independiente, ambas probabilidades son complementarias y la ecuación anterior se simplifica en la siguiente,

Ec. 2-11. Periodo de retorno de una sequía característica E de series independientes

$$T = \frac{1}{p_1 \cdot p_0} \cdot \frac{1}{P(S > S_0, D = D_0)}$$

La función de distribución bivariada depende de 1 variable aleatoria bidimensional compuesta por déficit y duración. Simplificadamente se utiliza la distribución Gamma de 2 parámetros para representar el déficit total acumulado en cada sequía. La ocurrencia de una sequía de determinada duración, variable discreta, se representa mediante una distribución geométrica en la que p_{01} es la probabilidad de año húmedo siendo el anterior seco. El producto de ambas distribuciones representa la probabilidad de un evento seco caracterizado por un déficit mayor que uno dado, D_0 , y determinada duración, L_0 . Esta probabilidad estaría dada por la integral del producto de las funciones de densidad, tal como se expresa en la Ec. 2-12 (Fu et al., 2005).

Ec. 2-12. Probabilidad de excedencia de una sequía en función de su duración y déficit (I)

$$P[D > D_0, L = L_0] = \int_D^{\infty} \frac{1}{\beta \cdot \Gamma(l_0 \cdot r)} \left(\frac{z}{\beta}\right)^{l_0 \cdot r - 1} \cdot e^{-z/\beta} \cdot p_{01} \cdot (1 - p_{01})^{l_0 - 1} dz$$

Si se consideran independientes los registros anuales, la probabilidad p_{01} es la de un año húmedo. Y al añadir la independencia entre el déficit y la duración, la distribución de probabilidad de sequía se expresa como el producto de las distribuciones de probabilidad (Ec. 2-13), evitando la dificultad de la integración de la expresión anterior.

Ec. 2-13. Probabilidad de excedencia de una sequía en función de su duración y déficit (II)

$$P[D \leq D_0, L = L_0] = G(D_0) \cdot p_{01} \cdot (1 - p_{01})^{l_0 - 1}$$

De acuerdo a la anterior expresión, el problema se plantea en el ajuste de una distribución de probabilidad Gamma de 2 parámetros al conjunto de déficit y al cálculo de la probabilidad de años secos o húmedos, 50%.

Para el ajuste de la Gamma se ha utilizado el método de máxima verosimilitud y los algoritmos implementados en R (R Development Core Team, 2008) utilizando las expresiones por momentos como valor inicial. Al retomar la Ec. 2-11 y la definición de periodo de retorno referida, queda la expresión siguiente,

Ec. 2-14. Periodo de retorno y probabilidad de excedencia

$$T = \frac{1}{p_0 \cdot p_1 \cdot P[D > D_0, L = L_0]}$$

Las relaciones entre duración y déficit se representan para cada periodo de retorno o frecuencia. Considerando varios periodos de retorno, se tiene el conjunto de curvas DDF que representan la variabilidad de frecuencias para distintos juegos de relaciones entre duración y déficit medio anual. Este modelo se puede usar indistintamente en series de lluvia y escorrentía. En el diagrama se dispone la variable discreta duración en el eje de abscisas y el déficit medio anual de una sequía de cierta duración en el eje de ordenadas. Este déficit medio anual se calcula como el cociente entre el total acumulado y la duración.



2.4 ÍNDICES BASADOS EN SERIES HIDROMETEOROLÓGICAS

Un índice de sequía es cualquier elemento que permita cuantificar las características de una sequía en el tiempo. Debe al menos tener suficiente duración y ser actualizable para evaluar las condiciones presentes (Heim, 2002). Los tipos de índices son numerosos (Mishra y Singh, 2010; Tallaksen y van Lanen, 2004; Pereira y Paulo, 2004; Smakthin y Hughes, 2004; Heim, 2002; Keyantash y Dracup, 2002; Hisdal et al., 1999; Menéndez, 1995; Cancillieri et al., 1995) y desarrollan diferentes técnicas de transformación, ponderación y estandarización de variables que ampliarían su aplicabilidad a regiones, climas y características hidrológicas heterogéneas. Son también numerosas las fuentes de información sobre los índices de sequía. Entre ellos podrían destacarse los siguientes:

- National Drought Mitigation Center⁶, NDMC, asociado a la propia Universidad de Nebraska Lincoln. El Centro de Mitigación de Sequías mantiene una página web con abundante información sobre índices, software para su evaluación o enlaces con otras instituciones especializadas en distintos aspectos de las sequías.
- Definiciones de índices de sequía⁷ y Guía para la Mitigación de los Efectos de la Sequía, ATV-DVWK German Association for Water⁸.

Keyantash y Dracup (2002) inciden en una serie de características a valorar en los índices. En orden de importancia serían su robustez o la deseable mínima sensibilidad respecto a las variables condiciones físicas al identificar la sequía; su complejidad de cálculo, siendo preferibles sencillos algoritmos; su claridad o transparencia como la propiedad relativa a la comprensión del significado físico; su grado de desarrollo, aunque sea contrario a la claridad de significado; la antigüedad de los periodos temporales en los que puede aplicarse; y finalmente la dimensionalidad que hace alusión a si el índice se define con unidades que lo relacionen con alguna variable física. Con arreglo a estas características se describe en los siguientes apartados una serie de índices recopilados de la extensa bibliografía existente.

2.4.1 Anomalía respecto a la Media

Keyantash y Dracup (2002) mencionan como primer índice histórico de sequías el cálculo de las anomalías de lluvia respecto al valor medio. Siendo x_i el valor registrado en el instante i comprendido entre 1 y n , la anomalía y_i se define como la diferencia respecto a la media o mediana calculada con un número suficientemente extenso de registros, x_0 . En el caso de series mensuales se entiende que la media es variable estacional o mensualmente.

Ec. 2-15. Anomalía respecto a un valor de referencia

$$y_i = x_i - x_0$$

El cálculo de este índice es muy sencillo, pero la sensibilidad al cálculo de la media es alta. En Keyantash y Dracup (2002) se destacan varios inconvenientes de este índice. En primer lugar, la necesidad de definir el inicio de sequía a partir de un déficit

⁶ <http://drought.unl.edu/>

⁷ <http://agua.geoscopio.com/medioambiente/temas/sequia/index.php>

⁸ <http://agua.geoscopio.com/medioambiente/temas/sequia/indicadores.php>

suficientemente importante. En segundo lugar, las anomalías de la formulación inicial no están estandarizadas por un estadístico como la desviación típica que facilitaría su comparabilidad.

2.4.2 Algoritmo del Pico Siguiendo y Desviación Acumulada

El criterio de valores acumulados también denominado algoritmo del pico siguiente utiliza la serie de desviaciones acumuladas, y_i , de la series x_i respecto a un estadístico de referencia, x_o , generalmente la media de la serie considerada. Keyantash y Dracup (2002) refieren el índice utilizado por Foley⁹ que estandariza cada anomalía de precipitación por el mismo estadístico, la media de la serie. También describen el de anomalía acumulada de aportaciones con el mismo fundamento. Tallaksen et al. (1997) y Menéndez (1995) presentan usando como variable el caudal y apuntan la posibilidad de usar como estadístico de referencia un porcentaje de la media. Se ha usado asimismo en series de superávit y déficit del recurso respecto a la demanda, lo que permitiría deducir asimismo cuál es el volumen regulable de una serie histórica.

La siguiente expresión muestra las dos opciones, con acumulación de anomalías o de anomalías estandarizadas respecto a la media. Se asume que las rachas de interés son las de anomalía negativa por lo que en la expresión siguiente se anulan las rachas de superávit.

Ec. 2-16. Desviaciones acumuladas y unitarias acumuladas

$$y_i = \left\{ \left(x_i - x_o \right) < 0, y_{i-1} + \left(x_i - x_o \right), 0 \right\}$$

$$y_i = \left\{ \left(\frac{x_i - x_o}{x_o} \right) < 0, y_{i-1} + \left(\frac{x_i - x_o}{x_o} \right), 0 \right\}$$

Siendo y_i el déficit acumulado, unitario o no, en el instante i , x_o el valor de referencia y x_i el valor de la variable en el instante i . En una sequía, el déficit máximo es el último valor de cada racha. La duración es la de la racha hasta ese instante de máximo déficit acumulado a partir del cual se inicia la recuperación.

Como se ha comentado en el apartado sobre las rachas, el aspecto del cronograma de sequías identificado mediante este procedimiento es entrecortado con numerosas sequías de corta duración entre otros cortos periodos de superávit. Si se valora este superávit se puede introducir un parámetro de recuperación expresado como porcentaje del déficit de la anterior y calibrado para enlazar adecuadamente estos periodos.

2.4.3 Quintil, Cuartil, Decil y Percentil y Probabilidad No Paramétrica

El valor de referencia que toman las anomalías de los apartados anteriores es sensible a la presencia de extremos. Desde este punto de vista, adquiere una ventaja la utilización de la distribución de frecuencias para deducir un estadístico de localización como la mediana, fijando el indicador de sequía en función de la probabilidad de

⁹ Foley, J. C., 1957: Droughts in Australia: Review of Records from Earliest Years of Settlement to 1955. Australian Bureau of Meteorology, Bull. 43, 281 pp.



CEDEX

ocurrencia de una variable hidrometeorológica. La distribución de frecuencias se extrae de la serie histórica registrada y los umbrales indicativos de la excepcionalidad de los estadísticos denominados quintiles, cuartiles, deciles o percentiles.

La asignación de probabilidad es no paramétrica y depende del conjunto de datos registrados. Para asignarles probabilidad de ocurrencia se ordena el conjunto de menor a mayor siendo la probabilidad de un valor menor o igual a cada dato, x_m , el valor de su orden m en la serie ordenada entre el número total de casos, n . Para evitar inconsistencias en la asignación de probabilidades a los máximos y mínimos se usan fórmulas corregidas. En Chow et al. (1988) se muestra una formulación general dependiente de un parámetro b .

Tabla 2. Fórmulas no paramétricas de probabilidad

	Modelo	b
Ec. 2-17. Probabilidad del suceso menor o igual a x_m	Hazen	0,5
	Chegodayev	0,3
	Weibull	0
	Blom	3/8
	Tukey	1/3
	Gringorten	0,44

$$P(X \leq x_m) = 1 - \frac{m - b}{n + 1 - 2 \cdot b}$$

Estas fórmulas se aplican a series estacionarias de variables de todo tipo, precipitación, caudal, escorrentía o aportación, nivel en acuíferos, reserva en embalses y de nieve, pH, oxígeno disuelto, nitratos, etc. La estimación del estadístico referido a una probabilidad determinada se obtiene por selección del valor más próximo a la probabilidad requerida o por promedio de los valores inmediatamente superiores e inferiores (R Development Core Team, 2008). Los percentiles más bajos servirían para la identificación de índices de sequía. Así, la OMM definía las sequías meteorológicas cuando los valores de precipitación caían por debajo del primer quintil de la serie o percentil 20%. Quintiles superiores sirven para gradar superiores estados de humedad o definir estrategias de actuación de acuerdo a la definición de situaciones de alerta, prealerta, emergencia o normalidad.

Este procedimiento es sencillo y el significado de las probabilidades calculadas es claro con un nivel de sofisticación reducido. Por ello, su uso está muy extendido y también se ha utilizado en el Sistema de Indicadores del Estado Hidrológico, SIEH, con variables como la lluvia, el caudal y las reservas de embalse, tal como se describe en el informe elaborado también para esta encomienda, *El Sistema de Indicadores de Estado Hidrológico, SIEH*.

Sin embargo, los estadísticos estimados son función de aspectos como la longitud de las series hidrológicas, la autocorrelación de las variables y su falta de homogeneidad, bien por la existencia de tendencias en las series o de componentes estacionales. La longitud de los registros influye en la robustez de los estadísticos y la identificación de componentes de variación plurianuales suele toparse con el inconveniente del corto periodo de registros.

Las componentes estacionales se asumen filtradas cuando se aíslan las series de cada mes, estación climática o desde el inicio de año hidrológico. Esto supone subdividir el conjunto completo de registros en tantos subconjuntos como elementos heterogéneos existan. Así, en series mensuales de lluvia se dispone de 4 ó de 12 subconjuntos en

función de si se considera que los datos heterogéneos son 4 correspondientes a las estaciones climáticas o son 12 correspondientes a cada uno de los meses y la muestra original se subdivide en otras de tamaño inferior según un ratio 1/4 ó 1/12. También se elaboran medias móviles de paso estacional, es decir, al menos 3 meses.

Con todo, la identificación de sequías es heterogénea respecto a dos factores, las variables hidrológicas y las regiones. Los mismos percentiles de las series no tienen el mismo significado según se trate con variables como la lluvia o el caudal y tampoco son lo mismo si se trata de una región u otra, tal como se deduce de las definiciones expuestas en la Tabla 1.

2.4.4 Valor Estandarizado

Un valor estandarizado de una variable normal se calcula dividiendo la anomalía respecto a la media por la medida de variabilidad, la desviación típica. La variable aleatoria final tiene media nula y desviación típica unidad y se considera un índice que establece una relación entre el estado de una variable hidrológica y la frecuencia de ocurrencia. Al transformar el valor original registrado a un valor estándar, se facilita la comparabilidad del estado hidrológico entre diferentes variables y regiones.

En series mensuales se han venido considerando las medias y desviaciones típicas mensuales para filtrar la componente heterogénea de estacionalidad. Aunque estos estadísticos se calculan en subconjuntos de la muestra original, el filtrado genera una serie mensual de la misma longitud que la original pero homogénea. Tomando una serie mensual $x_{i,j}$ registrada en el año i y mes j , μ_j la media de los valores $x_{i,j}$ del mes j , σ_j la desviación típica de los valores $x_{i,j}$ del mes j , el índice estandarizado $z_{i,j}$ será,

Ec. 2-18. Índice normalizado z

$$z_{i,j} = \frac{x_{i,j} - \mu_j}{\sigma_j}$$

Esta definición es análoga a la de una variable normalizada cuando ésta es normal con media y desviación típica dadas. Una función de distribución representa el comportamiento poblacional de las frecuencias de una variable aleatoria. Se parametriza usando la muestra de registros hidrológicos pero formula una hipótesis sobre la distribución de frecuencias subyacente que corregiría la escasez de registros. En la práctica, la distribución normal es la primera referencia sobre el comportamiento de una variable registrada en la naturaleza.

Sin embargo, no todas las variables hidrológicas siguen una distribución normal. Una señal de la falta de acuerdo entre la normal y la frecuencia de la variable hidrológica es la presencia de sesgos en los histogramas de frecuencias. Se suelen usar transformaciones normalizantes como la logarítmica que reduce los sesgos para seguir ajustando una distribución normal a los datos. En otros casos, se ajustan distribuciones más complejas como las Gamma de 2 y 3 parámetros, exponenciales en las series de lluvia o la logPearson III en las series de caudal (Wilks, 2006; Fiering y Jackson, 1971).

Un valor estandarizado presenta por tanto dos ventajas. Por un lado, estandariza las anomalías en relación a su variabilidad. Por otro, establece un puente con una variable normalizada y la asignación de frecuencias, inicialmente normales. Si la variable



hidrológica no es normal, es práctica habitual establecer una relación entre el valor registrado y el cuantil normalizado por medio de la probabilidad de ocurrencia de la distribución ajustada a la variable hidrológica. Si este valor de probabilidad se traslada (igualdad) al de la distribución normal de media nula y desviación unidad, se obtiene el cuantil estandarizado. Este valor es un índice que relaciona frecuencia y el valor registrado cualquiera que sea la distribución de frecuencias de la variable hidrológica.

Una sequía se caracteriza por registros anómalamente bajos de variables hidrológicas. Si se toma la distribución normal como referencia, un umbral de 0,0 corresponde a la media, -1,0, a un 15,85% de probabilidad, -1,5, a un 6,68% y un -2,0, a un 2,28%. Estas frecuencias justificarían la consideración de las definiciones de la Tabla 3.

Tabla 3. Carácter de la sequía en función del valor del índice estandarizado z

Carácter	z
Húmedo	$0,0 < z$
Normal	$-1,0 < z \leq 0,0$
Seco moderado	$-1,5 < z \leq -1,0$
Seco severo	$-2,0 < z \leq -1,5$
Seco extremo	$z \leq -2,0$

En la literatura inglesa los índices elaborados con estandarización suelen denominarse *Standardized* componiendo el acrónimo con el nombre de la variable y la palabra *Index*. La Tabla 4 cita algunos que posteriormente se desarrollan en los apartados siguientes.

Tabla 4. Indicadores de sequía por estandarización

Índice	Variable	Fundamento	Fórmula
SPI, <i>Standardized Precipitation Index</i> . Índice de precipitación estandarizada, IPE	Precipitación	Agregación de series de lluvia para representar el estado de otras variables hidrológicas como la humedad en el suelo o la aportación. Las lluvias acumuladas se ajustan a una función de distribución tomando como índice la z normal con la misma probabilidad. Se describe con detalle en el apartado 2.4.6	Ec. 2-18. Índice normalizado z
SSMI (<i>Standardized Soil Moisture Index</i>)	Humedad en el suelo	Es un indicador de humedad del suelo. Definida por el ratio de la humedad disponible respecto a la máxima almacenable, diferencia a su vez entre la humedad en capacidad de campo, θ_{CC} , y en punto de marchitez, θ_{PM}	Ec. 2-19. Índice SSMI $H_{ij} = \frac{\theta_{ij} - \theta_{PM}}{\theta_{CC} - \theta_{PM}}$ $SSMI_{ij} = \frac{H_{ij} - \bar{H}_j}{\sigma_{H_j}}$
SRI (<i>Standardized Runoff Index</i>)	Caudal	Entre escalas mensuales y estacionales, se ajusta una distribución de frecuencias a la serie de caudales y se toma como índice la z normal con la misma probabilidad	Ec. 2-18. Índice normalizado z

Índice	Variable	Fundamento	Fórmula
SDR (<i>Streamflow Drought Index</i>)	Caudal acumulado a inicio del año hidrológico	Es el valor normalizado del caudal medio acumulado a inicio del año hidrológico, V_m . Si Q_m es el caudal medio diario mensual del mes m	Ec. 2-20. Índice SDR $V_{ij} = \sum_{m=1}^i Q_m$ $SDR_{ij} = \frac{V_{ij} - \bar{V}_j}{\sigma_{V_j}}$
SSI (<i>Standardized Snowpack Index</i>)	Volumen de nieve	La variable de comparación es la cantidad de nieve acumulada durante un determinado periodo con la nieve acumulada de media para ese mismo periodo	Ec. 2-18. Índice normalizado z
SWI (<i>Standardized Water Level Index</i>)	Niveles freáticos	Compara los niveles freáticos de cada momento y los medios históricos. Como en el caso del SDR, se normalizan los valores mensuales o estacionales respecto a la media y desviación típica mensual o estacional	Ec. 2-18. Índice normalizado z

2.4.5 Índice de Precipitación Efectiva o Effective Drought Index (EDI)

El índice *EDI* fue formulado por Byun y Wilhite (1999). Usa la precipitación efectiva diaria como indicador del recurso y para su estimación propone usar la lluvia diaria ponderada por un factor decreciente en el tiempo. Este factor representaría la influencia decreciente de la lluvia registrada con el tiempo. El valor de la anomalía resultante de la estandarización de esta variable representa las condiciones de humedad que se clasifican con arreglo a los valores de la Tabla 5.

Tabla 5. Carácter de la sequía en función del valor del índice *EDI*¹⁰

Carácter	<i>EDI</i>
Normal	$-1,0 < EDI$
Moderado	$-1,5 < EDI \leq -1,0$
Severo	$-2,0 < EDI \leq -1,5$
Extremo	$EDI \leq -2,0$

Si la evaluación es estacional, se consideran los siguientes grados de sequía.

¹⁰ <http://www.wamis.org/agm/meetings/wies09/S62-Khanna.pdf>

Tabla 6. Carácter de la sequía estacional en función del valor del índice EDI¹¹

Estación climática	Carácter de la sequía	EDI
Primavera	Moderada	$-1,0 < EDI \leq -0,5$
	Severa	$-2,0 < EDI \leq -1,0$
	Extrema	$EDI \leq -2,0$
Húmeda	Moderada	$-2,0 < EDI \leq -1,0$
	Severa	$-3,0 < EDI \leq -2,0$
	Extrema	$EDI \leq -3,0$
Otra	Moderada	$-1,5 < EDI \leq -0,7$
	Severa	$-2,5 < EDI \leq -1,5$
	Extrema	$EDI \leq -2,5$

El siguiente recuadro sintetiza el procedimiento de cálculo del índice.

Procedimiento de cálculo del índice EDI:

Siendo N el paso temporal desde el que se considera la disponibilidad de recurso, m el orden del m día anterior al de cálculo de la lluvia efectiva (EP), P_m , la precipitación en mm de ese día, se obtendría una serie diaria de EP utilizando la siguiente expresión,

Ec. 2-21. EDI. Precipitación efectiva EP y formulaciones alternativas

$$EP_N = \sum_{n=1}^N \left(\frac{\sum_{m=1}^n P_m}{n} \right)$$

$$\text{alternativas: } EP_N = \sum_{m=1}^N P_m \cdot e^{-m/N} \quad \text{y} \quad EP_N = \sum_{m=1}^N \left[\alpha(N-m+1) \frac{P_m}{\sum_{n=1}^N n} \right]$$

El parámetro N permitiría estimar el periodo desde el cual la lluvia es deficitaria. En Byun y Wilhite (1999) se usan los valores de 365 cuando el interés se centra en el recurso hídrico siendo 365 el periodo en el que normalmente se acumula y se consume el recurso; es de 15 días cuando se estudian las sequías en los suelos.

Calculada la serie de EP diarias, se estima la media para un periodo de por ejemplo 30 años, MEP , para obtener la desviación de la precipitación efectiva, DEP :

Ec. 2-22. EDI. Desviación de la precipitación efectiva

$$DEP = EP - MEP$$

Si el índice anterior es negativo, la lluvia es inferior a la normal y el paso es seco. En sequía, se deben dar situaciones de extrema intensidad. El índice EDI es el valor estandarizado de la desviación DEP y la desviación típica de DEP , σ_{DEP} ,

¹¹ <http://atmos.pknu.ac.kr/~intra2/eng.calculation.htm>

Ec. 2-23. Índice EDI

$$EDI = \frac{DEP}{\sigma_{DEP}}$$

Un aspecto complejo del procedimiento es el reajuste de los periodos de cálculo conforme se identifican los periodos secos. En Byun y Wilhite (1999) se recomienda añadir la duración del periodo seco a los 365 días de partida y recalcular para ese día MEP y σ_{DEP} . En Byun y Lee (2002) se recomienda que supere el periodo completo de lluvias.

2.4.6 Índice de Precipitación Estandarizado (IPE) o Standardized Precipitation Index (SPI)

Este índice *IPE*, *SPI* en el acrónimo inglés, (McKee et. al, 1993 y 1995) se diseñó atendiendo a dos aspectos. En primer lugar, se entiende que la lluvia se ajusta a una distribución de frecuencia como la normal o la Gamma de dos parámetros y el índice de su carácter seco o húmedo se representaría mediante la variable normal estandarizada con la misma probabilidad de ocurrencia. En segundo lugar, se asume que cualquier variable hidrológica conserva la huella de la entrada de lluvia con una respuesta desfasada en el tiempo dependiente de las características hidrodinámicas del medio. Este desfase se contempla mediante una agregación de la lluvia de varios periodos temporales. Es decir, si se pretende obtener una señal equivalente de la dinámica de la humedad en el suelo, un indicador válido son las lluvias acumuladas en uno, dos, tres o incluso seis meses, que es la inercia que puede representar el suelo; si es de la escorrentía directa, esta agregación de lluvias es menor.

La elección de una distribución de referencia como la Gamma incompleta de dos parámetros no es determinante del modelo, aunque se suele considerar por defecto. Otras funciones utilizadas son la normal, Pearson III o Gamma de tres parámetros, la logarítmica normal y la exponencial. En todo caso, la dependencia al ajuste de la distribución y su representatividad bajo diferentes condiciones climáticas se contempla como una desventaja del procedimiento (Mishra y Singh, 2010). Keyantash y Dracup (2002) insisten en la necesidad de contar con series de 50 años para representar sequías de corta duración y de series mucho más extensas para las plurianuales.

Una sequía se define normalmente como la secuencia continua de valores del índice *IPE* comprendidos entre el primer valor inferior a -1 (umbral de inicio equivalente a un percentil del 15% aproximadamente) hasta el primer valor positivo (condición de recuperación) (Pereira y Paulo, 2004). La facilidad de uso e implementación con programas de uso libre descargables desde los servidores web de Colorado Climate Center¹², Western Regional Climate Center¹³ y National Drought Mitigation Center¹⁴ entre otros, hace que el IPE sea usado como índice de sequías por un número considerable de organizaciones y administraciones. El carácter de cada periodo de la serie se define tal como se muestra en la Tabla 7.

¹² <http://climate.atmos.colostate.edu/standardizedprecipitation.shtml> y <http://ccc.atmos.colostate.edu/>

¹³ <http://www.wrcc.dri.edu/>

¹⁴ <http://drought.unl.edu/monitor/spi.htm>

Tabla 7. Clasificación del índice *IPE*

Calificación	Valor índice
Extremadamente húmedo	$2,00 < IPE$
Muy húmedo	$1,50 < IPE \leq 2,00$
Moderadamente húmedo	$1,00 < IPE \leq 1,50$
Normal	$-1,00 < IPE \leq 1,00$
Moderadamente seco	$-1,50 < IPE \leq -1,00$
Muy seco	$-2,00 < IPE \leq -1,50$
Extremadamente seco	$IPE \leq -2,00$

En el siguiente recuadro se resume el procedimiento de cálculo del *IPE*.

Procedimiento de cálculo del índice *IPE*¹⁵

1. Seleccionar la serie temporal de cálculo y ajustar una función de distribución
2. Calcular la probabilidad de excedencia del valor en cuestión según esa distribución
3. Calcular el valor normalizado de la distribución normal de media nula y desviación unidad, z , que representa el valor del índice *IPE*
4. En casos en los que aparezcan ceros en la serie, se aplica una función de distribución incompleta fruto de considerar una función de distribución continua en los valores positivos y una discreta para los valores iguales a cero. Tomando $P(x \leq X)$ como probabilidad acumulada, queda:

Ec. 2-24. *IPE*. Tratamiento de una distribución incompleta

$$\left. \begin{aligned} P(x \leq X) &= P(x \leq X / X = 0) \cdot P(X = 0) + P(x \leq X / X \neq 0) \cdot P(X \neq 0) \\ P(x \leq X / X = 0) &= 1 \\ k &= \frac{\text{casos nulos}}{\text{total casos}} = 1 - P(X \neq 0) \end{aligned} \right\} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow P(x \leq X) = k + P(x \leq X / X \neq 0) \cdot P(X \neq 0) \Rightarrow P(x \leq X) = k + (1 - k) \cdot P(x \leq X / X \neq 0)$$

El ajuste de la función de distribución Gamma, o la que se estime conveniente, se realiza en $P(x \leq X / X \neq 0)$. La función gamma se expresa:

Ec. 2-25. *IPE*. Densidad de la distribución Gamma de 2 parámetros

$$g(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \cdot \Gamma(\alpha)} \cdot x^{\alpha-1} \cdot e^{-x/\beta}$$

$$x > 0$$

$$\alpha > 0, \text{ parámetro forma}$$

$$\beta > 0, \text{ parámetro escala}$$

$$\Gamma(\alpha), \text{ función gamma}$$

¹⁵ <http://climate.atmos.colostate.edu/standardizedprecipitation.shtml>

Ajustada por máxima verosimilitud según las expresiones

Ec. 2-26. *IPE*. Expresiones del ajuste por máxima verosimilitud de la Gamma de 2 parámetros

$$\hat{\alpha} = \frac{1}{4A} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{4A}{3}} \right); \quad \hat{\beta} = \frac{\bar{x}}{\hat{\alpha}}; \quad A = \ln(\bar{x}) - \frac{\sum \ln(x)}{n}$$

Una vez calculada la probabilidad con la función gamma incompleta, se calcula el correspondiente a la probabilidad total suponiendo conocido el porcentaje de elementos nulos para, finalmente, obtener el correspondiente cuantil de la función normal de media nula y varianza unidad, valor del *IPE*.

2.4.7 Índice de Palmer o Palmer Drought Severity Index (*PDSI*)

El índice *PDSI* (Pereira y Paulo, 2004; Heim, 2002; Alley, 1984; Palmer, 1965), estima la severidad, el inicio y fin de sequía en función de las condiciones de humedad existentes en el suelo. Utiliza variables como la humedad del suelo, la precipitación y la evapotranspiración potencial del modelo de Thornthwaite. Es un índice calculado en condiciones naturales y se usa a escala mensual, aunque existen modificaciones para mapas de evolución con paso semanal, tal como publica la NOAA¹⁶. El índice resultante tiene valores normalizados entre -4 y 4. Los negativos significan condiciones secas; los positivos, húmedas (Tabla 8).

Tabla 8. Índice de Palmer *PDSI*

Calificación	Valor índice
Extremadamente húmedo	4,0 < <i>PDSI</i>
Muy húmedo	3,0 < <i>PDSI</i> ≤ 4,0
Moderadamente húmedo	2,0 < <i>PDSI</i> ≤ 3,0
Ligeramente húmedo	1,0 < <i>PDSI</i> ≤ 2,0
Incipientemente húmedo	0,5 < <i>PDSI</i> ≤ 1,0
Normal	-0,5 < <i>PDSI</i> ≤ 0,5
Incipientemente seco	-1,0 < <i>PDSI</i> ≤ -0,5
Sequía ligera	-2,0 < <i>PDSI</i> ≤ -1,0
Sequía moderada	-3,0 < <i>PDSI</i> ≤ -2,0
Sequía severa	-4,0 < <i>PDSI</i> ≤ -3,0
Sequía extrema	<i>PDSI</i> ≤ -4,0

El siguiente recuadro muestra el procedimiento de cálculo del índice *PDSI*.

Procedimiento de cálculo del índice *PDSI*

Para el cálculo del índice *PDSI*, se realiza un balance de humedad de paso mensual. El suelo se representa con 2 capas: una superficial con capacidad de campo de 1 pulgada, 25,4 mm; y otra profunda, cuya capacidad de campo se parametriza. Al saturarse la capa superior, hay infiltración en la profunda. Cuando ambas están saturadas, se produce la escorrentía. Las variables y parámetros necesarios son:

- Precipitación mensual, P_i , siendo i el subíndice indicativo del orden del mes de cálculo en la serie completa

¹⁶ http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/regional_monitoring/palmer.gif



- Evapotranspiración potencial mensual, ETP_i , función de la temperatura media mensual según el método de Thornthwaite
- Capacidad de almacenamiento en el suelo, HAS , equivalente a la de campo

La lluvia mensual alimenta la evapotranspiración, la humedad del suelo y la escorrentía (Heim, 2002). En cada mes i se calculan:

- Evapotranspiración potencial y real. ETP_i y ETR_i
- Recarga al suelo, potencial y real. RP_i y R_i
- Escorrentía potencial y real. ESP_i y ES_i
- Pérdidas del volumen de agua del suelo, potenciales y reales, totales, LP y L , en la superficie LP_s y L_s y en el suelo, LP_u , y L_u

Si S_{si} y S_{ui} son las condiciones iniciales del almacenamiento en superficie y en el suelo al inicio de cada mes de cálculo i , las pérdidas reales desde superficie y suelo son:

Ec. 2-27. PDSI. Pérdidas reales desde superficie y suelo

$$L_{si} = \min(S_{si}, ETP_i - P_i); \quad L_{ui} = \left(\frac{ETP_i - P_i - L_{si}}{HAS} \right) \cdot S_{ui}$$

La recarga potencial, RP_i , es:

Ec. 2-28. PDSI. Recarga potencial

$$RP_i = HAS - (S_{si} + S_{ui})$$

Las pérdidas totales, LP_i , en términos potenciales son:

Ec. 2-29. PDSI. Pérdidas totales

$$LP_i = LP_{si} + LP_{ui}$$

$$LP_{si} = \min(ETP_i, S_{si}); \quad LP_{ui} \leq S_{ui} \Rightarrow LP_{ui} = \frac{ETP_i - LP_{si}}{HAS} \cdot S_{ui}$$

Cuando el almacenamiento inicial en la superficie del suelo, S_{si} , es suficiente para satisfacer los requerimientos de la evapotranspiración potencial, ETP_i , las pérdidas potenciales se satisfacen en superficie con LP_{si} ; en otro caso, se suma el término de pérdidas desde el suelo, LP_{ui} . La escorrentía potencial es la diferencia entre la capacidad de almacenamiento del suelo y la recarga potencial

Ec. 2-30. PDSI. Escorrentía potencial

$$ESP_i = HAS - RP_i$$

Una vez calculados los valores potenciales, se calculan los reales mediante balance. Utilizando las expresiones de la Universidad de Nebraska-Lincoln¹⁷, se parte de un

¹⁷ <http://drought.unl.edu/Planning/Monitoring/ComparisonofIndicesIntro/PDSI.aspx>

almacenamiento máximo en superficie de *1 pulgada* que se vacía cuando la demanda sea mayor que el influjo de agua. Este volumen es el primero en recargarse con excedente. El resto de almacenamiento máximo en el suelo es *HAS-1,0 pulgadas* o *HAS-25,4 mm*. Se supone que este segundo almacenamiento no puede vaciarse completamente en un solo paso. Los casos son:

$P \geq ETP$. Si la precipitación mensual es mayor que la *ETP* mensual, la evapotranspiración se da en tasas potenciales, no hay pérdidas de agua en el suelo y hay recarga y escorrentía,

Ec. 2-31. *PDSI*. *ETR* y pérdidas de agua en suelo con lluvia mayor que *ETP*

$$P_i \geq ETP_i \Rightarrow \begin{cases} ETR_i = ETP_i \\ L_i = 0 \end{cases}$$

Si el excedente de lluvia mensual respecto a la *ETP* mensual es mayor que el déficit de almacenamiento en superficie, hay suficiente agua para recargar el almacenamiento superficial y el suelo. La recarga en superficie es el déficit existente,

Ec. 2-32. *PDSI*. Recarga de superficie con lluvia mayor que *ETP*

$$P_i - ETP_i > 25,4 - S_{si} \Rightarrow R_{si} = 25,4 - S_{si}$$

Si el exceso de lluvia respecto a la *ETP* mensual y recarga en superficie es menor que el déficit existente en el suelo, el resto de agua que queda una vez sustraída la evapotranspiración potencial y la recarga del almacenamiento superficial, es absorbido por el suelo. La escorrentía es nula,

Ec. 2-33. *PDSI*. Recarga de suelo y escorrentía con lluvia mayor que *ETP*

$$P_i - ETP_i - R_{si} < HAS - 25,4 - S_{ui} \Rightarrow \begin{cases} R_{ui} = P_i - ETP_i - R_{si} \\ ES_i = 0 \end{cases}$$

Si hay excedente, se rellenan los dos niveles y la escorrentía es

Ec. 2-34. *PDSI*. Recarga de suelo y escorrentía con lluvia mayor que *ETP*

$$P_i - ETP_i - R_{si} \geq HAS - 25,4 - S_{ui} \Rightarrow \begin{cases} R_{ui} = HAS - 25,4 - S_{ui} \\ ES_i = P_i - ETP_i - (R_{si} + R_{ui}) \end{cases}$$

Quedando la recarga total como la suma de las anteriormente calculadas,

Ec. 2-35. *PDSI*. Recarga total con lluvia mayor que *ETP*

$$R_i = R_{si} + R_{ui}$$

Si el exceso de lluvia mensual respecto a la *ETP* mensual es menor que el déficit de almacenamiento en superficie, solo se recarga el almacenamiento superior y la



escorrentía es nula,

Ec. 2-36. *PDSI*. Recarga de superficie con lluvia mayor que *ETP*

$$P_i - ETP_i \leq S_{si} \Rightarrow \begin{cases} R_{si} = P_i - ETP_i \\ ES_i = 0 \end{cases}$$

$P < ETP$. Si la precipitación mensual es menor que la *ETP* mensual, parte de lo almacenado se consume en evapotranspiración real, sin generar recarga y escorrentía

Ec. 2-37. *PDSI*. Recarga total y escorrentía en suelo con lluvia menor que *ETP*

$$P_i < ETP_i \Rightarrow \begin{cases} R_i = 0 \\ ES_i = 0 \end{cases}$$

Si el déficit de lluvia mensual respecto a la *ETP* mensual es menor que el volumen superficial almacenado, la evapotranspiración consume este almacenamiento y la lluvia, quedando las pérdidas como

Ec. 2-38. *PDSI*. Cálculo de pérdidas de agua de superficie y suelo con lluvia menor que *ETP*

$$ETP_i - P_i < S_{si} \Rightarrow \begin{cases} L_{si} = ETP_i - P_i \\ L_{ui} = 0 \end{cases}$$

Si el déficit de lluvia mensual respecto a la *ETP* mensual es mayor que el volumen superficial almacenado, se consume parte de lo almacenado en la capa inferior del suelo, después de secar el almacenamiento superficial

Ec. 2-39. *PDSI*. Pérdidas de agua de superficie y suelo con lluvia menor que *ETP*

$$ETP_i - P_i \geq S_{si} \Rightarrow \begin{cases} L_{si} = S_{si} \\ L_{ui} = \left(\frac{ETP_i - P_i - L_{si}}{HAS} \right) \cdot S_{ui} \end{cases}$$

La pérdida total es suma de las correspondientes al almacenamiento superior y al inferior y la evapotranspiración real es suma de las pérdidas y la precipitación

Ec. 2-40. *PDSI*. Pérdidas de agua totales y evapotranspiración real con lluvia menor que *ETP*

$$\begin{aligned} L_i &= L_{si} + L_{ui} \\ ETR_i &= P_i + L_i \end{aligned}$$

Una vez calculados los valores mensuales de las variables anteriores, para cada mes se calculan los medios y los siguientes coeficientes de paso entre términos potenciales y los reales. Siendo *j* el índice indicativo del mes (1 a 12) y *k* el índice indicativo del año (1 a *n*, siendo el recorrido de *i* de 1 y $12 \cdot n$), queda:

Ec. 2-41. *PDSI*. Coeficientes de paso de términos potenciales a reales

$$\alpha_j = \frac{\overline{ETR}_j}{\overline{ETP}_j} = \frac{\sum_{\text{años}} ETR_k}{\sum_{\text{años}} ETP_k} \quad \beta_j = \frac{\overline{R}_j}{\overline{RP}_j} = \frac{\sum_{\text{años}} R_k}{\sum_{\text{años}} RP_k}$$

$$\gamma_j = \frac{\overline{ES}_j}{\overline{ESP}_j} = \frac{\sum_{\text{años}} ES_k}{\sum_{\text{años}} ESP_k} \quad \delta_j = \frac{\overline{L}_j}{\overline{LP}_j} = \frac{\sum_{\text{años}} L_k}{\sum_{\text{años}} LP_k}$$

La precipitación *climatológicamente apropiada a las condiciones existentes* en el mes *i* es,

Ec. 2-42. *PDSI*. Precipitación climatológicamente apropiada del mes *i*

$$P_i^* = \overline{ETR}_i + \overline{R}_i + \overline{ES}_i - \overline{L}_i$$

Y la desviación d_i de la precipitación registrada en el mes *i* respecto a su media en el mes *j* es,

Ec. 2-43. *PDSI*. Desviación de la precipitación registrada

$$d_i = P_i - P_i^* = P_i - (\alpha_j \cdot \overline{ETP}_i + \beta_j \cdot \overline{RP}_i + \gamma_j \cdot \overline{ESP}_i - \delta_j \cdot \overline{LP}_i)$$

El índice Z_i representa la anomalía de la humedad en el suelo durante el mes *i*. Es producto del factor d_i anterior por un factor K_j calculado en función de expresiones ajustadas a condiciones locales y estacionales, tal como sigue:

Ec. 2-44. *PDSI*. Índice de anomalía de humedad Z y factor de ponderación K del mes *j*

$$\overline{D}_j = \frac{\sum |d_k|}{n}; \quad K_j^1 = 1,5 \cdot \log_{10} \left(\frac{\overline{ETP}_j + \overline{R}_j + \overline{ES}_j + 2,8}{\overline{L}_j + \overline{P}_j} \cdot \frac{\overline{D}_j}{\overline{D}_j} \right) + 0,5; \quad K_j = \frac{17,67}{\sum_{m=1}^{12} \overline{D}_m \cdot K_m^1} \cdot K_j^1$$

y finalmente $Z_i = d_i \cdot K_j$

La anomalía de humedad Z_i , es un índice de sequía de la humedad en el suelo que no dependería de la estación ni de la región. Conforme a la deducción de Palmer, durante la evolución de una sequía con el mismo nivel de intensidad, se puede establecer la siguiente relación:

Ec. 2-45. *PDSI*. Valor de X_i

$$X_i = 0,897 \cdot X_{i-1} + 0,333 \cdot Z_i$$

Los factores de duración 0,897 y 0,333 proceden de calibración bajo condiciones climáticas de experimentación. En el índice *PDSI* se distinguen tres índices intermedios: índice para el inicio de periodos húmedos, X_1 , positivo; otro para el inicio de periodos secos, X_2 , negativo; y un último que indica la ocurrencia de un periodo



definido, seco o húmedo, X_3 . El índice $PDSI_i$ es el valor de uno de estos X_i de acuerdo a determinadas reglas. Una sequía se entiende desarrollada cuando se alcanza por primera vez un valor de X_2 inferior a $-1,00$. Al contrario, un periodo húmedo se considera establecido cuando X_1 es superior a $1,00$. En estos momentos X_3 toma el valor de X_1 o X_2 . Este periodo húmedo o de sequía concluye cuando el valor X_3 se sitúa entre $-0,5$ y $0,5$. La Tabla 8 muestra la clasificación del índice $PDSI$ entre 4 y -4

Un inconveniente del modelo es la específica representación del ciclo hidrológico utilizada basada en un modelo de dos capas de suelo, pero sin consideración explícita de elementos como la nieve. Alley (1984) recopila varios puntos como son la selección del modelo de Thornthwaite para el cálculo de la ETP , la parametrización de una primera capa de suelo con $25,4$ mm de capacidad, la falta de consideración de la variabilidad de las relaciones entre lluvia y ETP a lo largo del mes con el uso de la tasa de evapotranspiración potencial, la falta de consideración de la estacionalidad del suelo y vegetación en la capacidad de almacenamiento del suelo y la de la propagación de las escorrentías generadas. Además, el modelo se parametriza para unas condiciones locales de las que dependen la evaluación del índice. Así, Keyantash y Dracup (2002) destacan que en función de la región tiende a dar valores más o menos severos lo que evidencia la falta de comportamiento estandarizado y las diferencias de significado regionales.

Sin embargo, ha sido ampliamente utilizado y conceptualmente propone una vía de desarrollo para otros modelos hidrológicos. Son utilizados el propio índice $PDSI$, el índice Z como anomalía de humedad en el suelo y el índice hidrológico de Palmer, $PHSI$, equivalente al X_3 de la formulación original (Heim, 2002).

2.4.8 Índice de Humedad del Cultivo o Crop Moisture Index (CMI)

El índice CMI fue también formulado por Palmer para realizar un seguimiento a corto plazo de las condiciones de humedad en el suelo que influyen en el crecimiento de la planta (Keyantash y Dracup, 2002). Se calcula utilizando parámetros del modelo de Palmer y variables como la temperatura, la precipitación total semanal y el valor del índice calculado en el paso anterior. El índice es suma del déficit respecto a la evapotranspiración y recarga del suelo. El siguiente recuadro resume el proceso de cálculo del índice.

Procedimiento de cálculo del índice CMI (Universidad de Nebraska-Lincoln¹⁸)

Variables y parámetros necesarios:

- Evapotranspiración potencial mensual, ETP_i , i el subíndice indicativo del mes. Calculada por el método de Thornthwaite
- Capacidad de almacenamiento en el suelo, HAS , equivalente a la de campo

El cálculo se inicia estimando el % almacenado en el suelo. Se distinguen 2 almacenamientos: parte superior e inferior del suelo. Siendo S_{si} la cantidad de agua

¹⁸ <http://nadss.unl.edu/PDSIReport/pdsi/cmi.html>

almacenada en la superior del suelo y S_{ui} en la inferior, el % en la semana i es

Ec. 2-46. CMI. Llenado del suelo

$$M_i = \frac{S_{si} + S_{ui}}{HAS}$$

A continuación se calcula una desviación relativa de evapotranspiración, DE_i , utilizando un coeficiente α . La evapotranspiración real es ETR_i (modelo de Palmer),

Ec. 2-47. CMI. Desviación relativa de evapotranspiración

$$DE_i = \frac{ETR_i - \alpha \cdot ETP_i}{\sqrt{\alpha}}$$

El déficit de evapotranspiración, Y_i , se calcula utilizando una aproximación inicial, Y'_i .

Ec. 2-48. CMI. Índice del déficit de evapotranspiración

$$Y'_i = 0,67 \cdot Y'_{i-1} + 1,8 \cdot DE_i$$

$$Y'_i < 0 \Rightarrow Y_i = Y'_i$$

$$Y'_i \geq 0 \Rightarrow Y_i = M \cdot Y'_i$$

H es un factor intermedio calculado mediante el valor antecedente del índice de exceso de humedad en la semana i , G_{i-1} .

Ec. 2-49. CMI. Índice de exceso de humedad

$$G_{i-1} = 0 \Rightarrow H = 0$$

$$0 \leq G_{i-1} < 0,5 \Rightarrow H = G_{i-1}$$

$$0,5 \leq G_{i-1} < 1 \Rightarrow H = 0,5$$

$$G_{i-1} \geq 1 \Rightarrow H = 0,5 \cdot G_{i-1}$$

Y se actualiza el valor de G_i conocidos los valores de recarga y escorrentía (modelo de Palmer) en la semana i ,

Ec. 2-50. CMI. Índice de exceso de humedad actualizado

$$G_i = G_{i-1} - H + M_i \cdot R_i + ES_i$$

El valor del índice es suma de los índices Y_i y G_i ,

Ec. 2-51. Índice CMI

$$CMI_i = Y_i + G_i$$

No es propiamente un índice de sequías al estar orientado al seguimiento de las condiciones del cultivo en intervalos semanales de tiempo. En estos intervalos son importantes las aportaciones procedentes de tormentas que alivian las necesidades en el crecimiento de una planta, pero que no representan un aporte sustancial al registrar



sequías de mayor escala (Keyantash y Dracup, 2002). Se puede encontrar información sobre su evaluación en diversas páginas web de EE.UU.¹⁹.

2.4.9 Índices de Suministro de Aguas Superficiales o Surface Water Supply Index (SWSI) y del Bureau of Reclamation (RDI)

Shafer y Dezman (1982) desarrollaron el índice SWSI empleando 4 variables hidrológicas: precipitación, escorrentía superficial, reservas en embalses y nieve, que reflejaran el estado de las disponibilidades de recursos hídrico en una región. Originalmente se aplicó en Colorado con el objeto de obtener un indicador con información sobre las reservas de nieve.

Tabla 9. Clasificación de SWSI y del RDI

Calificación	Valor índice SWSI	Calificación	Valor índice RDI
Extremadamente húmedo	3,0 < SWSI ≤ 4,0	Extremadamente húmedo	4,0 < RDI
Moderadamente húmedo	2,0 < SWSI ≤ 3,0	Moderadamente húmedo	1,5 < RDI ≤ 4,0
Ligeramente húmedo	1,0 < SWSI ≤ 2,0	Normal o ligeramente húmedo	0,0 < RDI ≤ 1,5
Normal	-1,0 < SWSI ≤ 1,0	Normal o ligeramente seco	-1,5 < RDI ≤ 0,0
Ligeramente seco	-2,0 < SWSI ≤ -1,0	Moderadamente húmedo	-4,0 < RDI ≤ -1,5
Moderadamente seco	-3,0 < SWSI ≤ -2,0	Extremadamente húmedo	RDI ≤ -4,0
Extremadamente seco	-4,0 < SWSI ≤ -3,0		

En el siguiente recuadro se resume el procedimiento de cálculo del SWSI.

Elaboración del índice SWSI:

Dado un conjunto de observatorios en una cuenca, de las diferentes variables consideradas, se componen 4 series por suma del conjunto de registros de cada variable: estaciones pluviométricas, volúmenes almacenados en los embalses de la cuenca, datos registrados en las estaciones de aforo y volúmenes de nieve

De cada serie se calculan las probabilidades de no excedencia. Estas probabilidades se ponderan para obtener un valor único de la probabilidad de disponibilidad de agua. Los pesos se ajustan de acuerdo a la importancia de cada variable en el recurso de la cuenca dada

Ec. 2-52. Índice SWSI

$$SWSI = \frac{a \cdot P_{pre} + b \cdot P_{cau} + c \cdot P_{res} + d \cdot P_{nie} - 50}{12}$$

$$a + b + c + d = 1$$

El valor 50 que sustrae de la suma ponderada permite reescalar la media a un valor de 0 y el denominador 12 hace que los valores oscilen entre -4,2 y +4,2

Los volúmenes de nieve y almacenamiento en embalses se refieren al estado a inicio de cada mes, mientras que la lluvia o aportación mensual son del mes o de los precedentes.

¹⁹ http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/regional_monitoring/cmi.gif

El índice *SWSI* se pondera de distinta manera en función de la estación climática. En verano depende de los caudales, de las reservas en embalses y de la precipitación; en invierno de la precipitación, de las reservas de nieve y de los volúmenes embalsados. Es, sin embargo, un índice de compleja aplicación ya que exige el conocimiento de la hidrología regional para estimar el peso de cada componente y la particularización de los estudios de frecuencias de cada una de estas variables.

Una ventaja del índice es que sus resultados al ser estandarizados mediante la probabilidad de no excedencia son comparables de una a otra cuenca. Por el contrario, Garen (1993) destaca que los inconvenientes más importantes residen en la manera subjetiva de definir los pesos. En segundo lugar, recuerda que por un lado se pondera la probabilidad de ocurrencia conjunta como suma ponderada de 4 probabilidades, lo cual puede no ser correcto. Por otro lado, la variable aleatoria definida como la probabilidad de ocurrencia de cada variable es uniforme y al ponderar las 4 resulta una variable aleatoria uniforme, lo que contradice al teorema central del límite según el cual la distribución del índice sería normal cualquiera que fuesen las distribuciones de partida. De hecho Garen cita trabajos de Doesden y de Shafer y Dezman que respaldarían que también experimentalmente los resultados ponderados seguirían una normal. Debido a esto, el índice resulta finalmente particular de cada región o cuenca en la que se establecen los coeficientes de ponderación tal como indica la web del NDMC²⁰. Mishra y Singh (2010) destacan la heterogeneidad de la frecuencia de las variables de partida, la diferente ponderación de cálculo en función de la estación climática y el diferente significado del índice bajo diferentes condiciones hidrológicas.

El índice *SWSI* puede ser utilizado para la identificación de situaciones de sequía en cuencas alteradas utilizando un recurso real estimado a partir de 4 variables principales que pueden ser ampliadas de acuerdo a las características hidrológicas de cada cuenca. Se ha utilizado en combinación con otros índices como el *PDSI* para la activación de las medidas del Plan de Sequías de Colorado. El Bureau of Reclamation ha seguido esta metodología para definir el *Reclamation Drought Index, RDI*, que considera además términos de temperatura y evaporación. La página web NDMC²¹ tiene enlaces a series históricas de mapas del índice *SWSI* calculado en cuencas y tramos fluviales, a los que se le asignan leyendas (Tabla 9) para determinar su estado húmedo o seco.

2.4.10 Otros Indicadores

Por último se citan algunos indicadores de los que se cuenta con escasa información en publicaciones científicas.

2.4.10.1 Water Exploitation Index (WEI)

El índice *WEI* se elabora como cociente entre las detracciones de agua anuales en un sistema y el recurso hídrico anual. El último podría evaluarse simplificadaamente a escala anual como la precipitación, menos evapotranspiración real, más importaciones

²⁰ <http://drought.unl.edu/Planning/Monitoring/ComparisonofIndicesIntro/SWSI.aspx>

²¹ <http://nriscs.gov/nrcs/swsi/Monthly.asp> y <http://nriscs.gov/drought/default.asp>



superficiales y subterráneas menos exportaciones superficiales y subterráneas. Su uso está recomendado por la Agencia Europea de Medio Ambiente²² como indicador de presión sobre los recursos hídricos cuando en el denominador se hace figurar el recurso hídrico medio anual.

Se trata de un indicador que compara dos tipos de variables fundamentales para el estudio de la sequía, demandas y recurso hídrico. Sin embargo, su determinación es compleja ya que a la dificultad de estimación del recurso hídrico natural añade la capacidad de registro y de control de la alteración en el ciclo hidrológico.

2.4.10.2 Indicador de Aridez de Palfai (PAI)

El índice de Palfai²³ se elabora tomando a julio como el mes crítico para el suministro de agua. Utiliza únicamente la temperatura media del aire entre abril y agosto que, a su vez, se divide por la precipitación ponderada entre los meses de octubre y agosto. Siendo T_i la temperatura de cada mes en °C y P_i la precipitación total mensual en mm, el indicador base PAI_o es

Ec. 2-53. Índice PAI

$$PAI_o = 100 \cdot \frac{\sum_{\text{abril}}^{\text{agosto}} T_i}{10 + \sum_{\text{oct}}^{\text{sep}} \omega_i \cdot P_i}$$

Los pesos de cada mes se han obtenido en cuencas de Hungría considerando la humedad del suelo y la evolución de la demanda del regadío por lo que son crecientes hasta el verano (Tabla 10).

Tabla 10. Pesos aplicados a las precipitaciones del índice PAI

Oct	Nov	Dic-Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	SUMA
0,1	0,4	0,5	0,8	1,2	1,6	0,9	0,1	7,6

En su formulación se corrige la existencia de un número anómalo de días calurosos de junio a agosto mediante el cociente entre la temperatura media de estos meses de verano y la media anual, k_1 . El carácter de la precipitación, mediante el cociente entre la total de verano y la anual, k_2 . Un último coeficiente, k_3 , representa o bien la relación entre la lluvia de los 36 meses anteriores y la anual o bien el peso de la componente subterránea.

Ec. 2-54. PAI corregido

$$PAI = PAI_o \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3$$

²² <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/water-exploitation-index/water-exploitation-index>

²³ Palfai, I., 1990: Description and forecasting of droughts in Hungary. Proc. of 14th Congress on Irrigation and Drainage (ICID), Rio de Janeiro, Vol. 1-C,p. 151-158

El índice toma un valor de referencia alrededor de 6,0; valores menores indican año húmedo, mayores, seco. La Tabla 11 muestra las diferentes condiciones de sequía en función del valor del índice *PAI*

Tabla 11. Índice *PAI*

Calificación	Valor índice
Sequía extrema	30,0 < PAI
Sequía muy seria	15,0 < PAI ≤ 30,0
Sequía seria	10,0 < PAI ≤ 15,0
Sequía severa	8,0 < PAI ≤ 10,0
Sequía moderada	6,0 < PAI ≤ 8,0
Sequía ligera	4,0 < PAI ≤ 6,0
No hay sequía	PAI ≤ 4,0

2.4.10.3 Índice del Potencial AgroHidrológico (AHP)

El Potencial Agro-Hidrológico (*AHP*)²⁴ se elabora como cociente entre la evapotranspiración real y la potencial, es decir, entre el agua consumida y la dotación (Tabla 12). Es por tanto un indicador de estrés hídrico que se supone aplicable a escala diaria. La severidad de la sequía se expresa como el número de días en que las plantas están sometidas a relaciones *AHP* inferiores a 0,5.

Tabla 12. Índice AHP

Calificación	Índice AHP
No hay escasez	0,8 < AHP ≤ 1,0
Hay leves restricciones de dotación	0,5 < AHP ≤ 0,8
Suministro restrictivo y escasez importante	0,3 < AHP ≤ 0,5
Estrés hídrico. Pérdida de biomasa	0,0 < AHP ≤ 0,3

2.4.10.4 Índice de Disponibilidad del Recurso Hídrico o Available Water Resources Index (AWRI)

Se trata de un índice derivado del de precipitación efectiva desarrollado por Byun y Wilhite (1999). En Byun y Lee (2002) y Oh et al. (2012) el índice se calcula como cociente entre la precipitación efectiva *EP* y un sumatorio que considera el número de meses de lluvia acumulada (*D*).

Ec. 2-55. Índice AWRI

$$AWRI_i = \frac{EP_i}{\sum_{i=1}^D 1/i}$$

Cuanto mayores sean los valores del índice AWRI, mayor disponibilidad de recurso, Byun y Lee (2002) destacan la dificultad de parametrizar el valor de *D*. Considerando un ciclo anual de lluvias recomiendan usar un valor de *D* a contar desde el final de la época de lluvias.

²⁴ German Association for Water, Waste Water and Waste, ATV-DVWK



2.4.11 Síntesis Parcial

La Tabla 13 muestra un listado de virtudes y debilidades sobre el anterior conjunto de indicadores de sequía.

Tabla 13. Síntesis sobre los Indicadores de Sequía

Índice	Paso temporal	Virtudes	Debilidades
Anomalías simples y acumuladas	Mensual, estacional y anual	<ol style="list-style-type: none"> 1. Claro significado 2. Elaboración sencilla 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Incertidumbres respecto al momento de entrada en sequía 2. Aparecen inconsistencias de los estadísticos de referencia 3. Sin estandarizar la variabilidad
Cuantiles y percentiles	Mensual, estacional, anual	<ol style="list-style-type: none"> 1. Sin dependencia a función de distribución 2. Sencillez 3. Aplicable a cualquier variable hidrológica 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Mayor consistencia con series largas 2. Indicador particular de cada variable y región 3. Normalmente usado con series cortas y con autocorrelación 4. Incertidumbres respecto a la heterogeneidad de las series
Estandarizado	Mensual, estacional, anual	<ol style="list-style-type: none"> 1. Sencillez conceptual 2. Indicador comparable entre variables y regiones 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Necesidad de estudio de las funciones de distribución asociadas y parametrización 2. Mayor consistencia con series largas 3. Normalmente usado con series cortas y con autocorrelación
EDI	Mensual, estacional y anual	<ol style="list-style-type: none"> 1. Consideración de una función de pérdidas 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Complejidad práctica respecto al parámetro de agregación 2. Idoneidad de la función de pérdidas
IPE	Mensual, estacional y anual	<ol style="list-style-type: none"> 1. Uso extendido y programas de uso libre 2. Adaptación a varias variables hidrológicas en función del paso temporal 3. Mismo significado en diferentes regiones 4. Descriptivo del déficit 5. Detección temprana 	<ol style="list-style-type: none"> 1. La respuesta hidrológica de otras variables no se representa únicamente en función del paso temporal de agregación 2. Dependencia a las condiciones de ajuste de la distribución, normalmente Gamma y a la longitud de la muestra
PDSI	Mensual, estacional y anual	<ol style="list-style-type: none"> 1. Uso extendido y programas accesibles 2. Alto grado de desarrollo y sofisticación para describir el déficit, inicio y fin 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Índice relacionado con la humedad del suelo 2. Depende de la específica representación del ciclo hidrológico 3. Alta complejidad operativa en su formulación original 4. En la práctica ofrece resultados dependientes de las características hidrológicas de una región
CMI	Semanal	<ol style="list-style-type: none"> 1. Seguimiento a corto plazo de las necesidades de los cultivos 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Complejidad operativa 2. No adecuado para sequías de escala distinta a la de las necesidades de los cultivos

Índice	Paso temporal	Virtudes	Debilidades
SWSI	Mensual, estacional, anual	1. Combina en un único índice la información de varias variables 2. Flexibilidad en la formulación	1. Problemas teóricos respecto a la ponderación y frecuencias asociadas 2. Heterogeneidad estacional en las series ponderadas por contribución de variables como la nieve 3. Diferente significado bajo diferentes condiciones hidrológicas
WEI	Mensual, estacional y anual	1. Consideración de demandas y recursos	1. Dificultad para el registro y estimación de todas las variables 2. Escasez de información
PAI	Año agrícola	1. Sencillez de la formulación 2. Uso de temperatura y precipitación	1. Objetivo agrícola 2. Escasez de información
AHP	Diaria	1. Sencillez de la formulación con significado físico 2. Uso de evapotranspiración real y potencial	1. Objetivo agrícola a escala de parcela donde se maneje la relación entre dotaciones y disponibilidades de agua 2. Escasez de información sobre el índice
AWRI		1. Indicador de recursos hídricos 2. Solamente necesita de la variable lluvia	1. Complejidad del parámetro de agregación

Cualquier índice presenta algún tipo de inconveniente. Por ello, los sistemas de indicadores de estado hidrológico suelen incorporar varios índices compensando el conjunto virtudes y debilidades. En este conjunto, unos indicadores son seleccionados por la sencillez de cálculo y claro significado, tal como ocurre con los percentiles de las series hidrológicas. Los índices estandarizados dan un paso en su formulación hacia una caracterización homogénea bajo diferentes condiciones hidrológicas. Otros indicadores como es el caso del *IPE*, *EDI*, *SWSI* y *PDSI* materializan un esfuerzo mayor para representar las características de las sequías. Sin embargo, hay dependencia a condiciones de calibración, lo que hace que la sofisticación con la que han sido ideados se vuelva un inconveniente. Así ocurre al tratar con el índice de *PDSI* en el que el sentido de algunos parámetros es oscuro para ser calibrados y ajustados en cada región; con el *SWSI* que, partiendo de una idea clara como es la ponderación de distintas variables hidrológicas, pierde el sentido físico de su frecuencia de ocurrencia al mezclar las frecuencias ponderadas de varias variables. De acuerdo a esta consideración, indicadores como el *IPE* con una elaboración menos compleja adquieren ventaja, a pesar de la dificultad para representar otras variables hidrológicas por agregaciones de lluvia de varios meses. Es además un índice muy utilizado con un numeroso número de publicaciones descriptivas.

2.5 ÍNDICES BASADOS EN LA TELEDETECCIÓN

La teledetección se ha utilizado para el seguimiento e identificación de sequías desde los años 80, en buena parte debido a las necesidades de estudio de sus impactos en la agricultura. El principio básico de la teledetección consiste en el registro de la energía reflejada en distintos espectros y de su variación de acuerdo al estado de la planta y el contenido de agua en el suelo. La señal reflejada depende del contenido de la clorofila



y de humedad en la hoja, así como de la temperatura en superficie. De esto se deduce su grado de estrés y, por extensión, las condiciones de sequía (Kogan, 2001). Entre las ventajas de la teledetección está el que abarca grandes extensiones de territorio, el registro es inmediato y permitiría captar la variabilidad espacial de una variable, ofreciendo más información respecto a la captada por sensores terrestres con densidades irregulares a lo largo y ancho del territorio, tal como ocurre al contrastar la abundancia de estaciones en valle con la escasez de montaña (Rahimzadeh-Bajgiran et al, 2012; Vicente-Serrano et al, 2012). Además, las imágenes de teledetección son hoy accesibles a través de los servidores de agencias.

La respuesta espectral de las masas vegetales depende entre otros factores de su estado vegetativo, de la acción de los pigmentos foto-sintéticos y del agua que almacenan las hojas. La vegetación vigorosa da una baja reflectividad en el dominio del visible (580-680 nm) debido al efecto absorbente de los pigmentos de la hoja (clorofila, xantofila y caroteno). Da un máximo relativo en la región del verde del espectro (ρ_V , 495-570 nm) y una elevada reflectividad en el infrarrojo cercano (ρ_{IRC} , 780-1.400 nm) que se reduce paulatinamente hacia el infrarrojo medio (ρ_{IRM} , 1.500-2.500 nm) por el efecto absorbente del agua. En el infrarrojo medio se distinguen el medio de onda corta (ρ_{IROC} , 1.500-1.750 nm) y el de onda larga (ρ_{IROL} , 1.750-2.500 nm).

Un indicador de un buen estado vegetativo se obtiene cuando se registra un pico de reflectancia entre 1.550 y 1.750 nm. Al contrario, con un bajo contenido de agua en la planta, se registra baja reflectancia entre 1.500 y 1.630 nm. La Figura 2 muestra la curva de reflectividad²⁵ de diversas cubiertas. Entre ellas se encuentra la obtenida en laboratorio de una hoja verde que permite comprobar el comportamiento anterior. La tierra seca muestra una curva monótona y de suave curvatura mientras que la nieve muestra una alta reflectividad en el visible y alta absorción alrededor de los 1.500 y 2.000 nm, tal como le ocurre a la hoja verde. La hoja seca pierde la nota de absorción en estas longitudes de onda (Chuvieco, 1996; Hunt y Rock, 1989; Tucker, 1980).

²⁵ % reflejado de la energía incidente

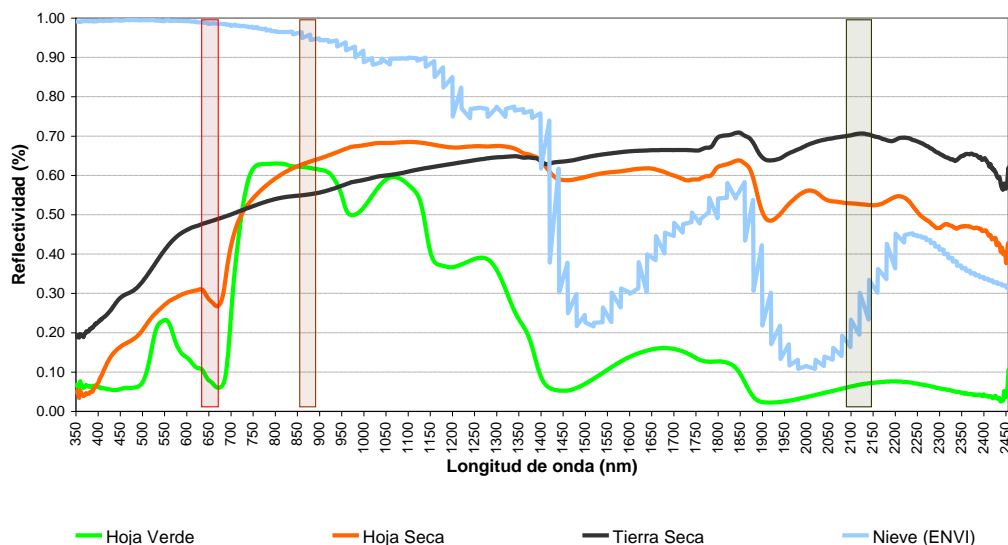


Figura 2. Curvas de reflectividad de diversas cubiertas

El comportamiento espectral teórico es la base para definir una serie de índices de vegetación basados en el contraste entre bandas espectrales. Cuando la vegetación sufre algún tipo de estrés, su comportamiento espectral se ve alterado. Una hoja enferma pierde actividad clorofílica, y en consecuencia, aumenta su reflectividad en las bandas azul (ρ_A , 460-482 nm) y roja (ρ_R , 618-780 nm) del visible, eliminando el máximo relativo del verde. Por el contrario, en el infrarrojo cercano se reduce su reflectividad al deteriorarse la estructura celular de la hoja. También se ha comprobado una clara relación entre el cociente de reflectividades del infrarrojo medio e infrarrojo cercano y el contenido de humedad en las hojas, lo que permite identificar zonas afectadas por estrés hídrico (Chuvieco, 1996).

El satélite Landsat ERTS (Earth Resource Technology Satellite) se lanzó en 1972. Landsat-7 es el más reciente. Está en órbita desde 1999 siendo Landsat-5 el que más tiempo lleva en órbita, desde 1984. Los satélites Landsat disponen de 2 sensores, MSS (Multispectral scanner) con 6 bits de resolución radiométrica y TM (Thematic mapper) de 8 bits. Landsat-7 incorpora el sensor ETM (Enhanced Thematic Mapper) que añade un canal pancromático con resolución espacial de 15 m a las bandas ya disponibles en el TM. Su órbita se sitúa a 705 Km de altitud y sobrevuela la misma zona cada 16 días. Su resolución espacial es de 30 m para las bandas B1, B2, B3, B4, B5 y B7.

El radiómetro AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) fue diseñado para la observación meteorológica (determinación de cobertura de nubes y temperatura de la superficie). Hay varios modelos del instrumento. El AVHRR/1, el AVHRR/2 y el AVHRR/3. Proporcionan datos en distintos intervalos dentro del rango visible, infrarrojo cercano e infrarrojo térmico del espectro electromagnético con resolución espacial de 1.100 m. Las observaciones en los canales del visible y el infrarrojo cercano permiten observar vegetación, nubes, lagos, costas, nieve y hielo. Los otros 3 canales operan en el infrarrojo térmico y permiten obtener la temperatura de la Tierra, temperatura de la superficie del agua y de las nubes. El canal adicional del modelo AVHRR/3, llamado 3A, mejora la capacidad de discriminación entre nieve, hielo y nubes.



El sensor MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) está incorporado en 2 satélites de la NASA: "TERRA (EOS AM)" y "AQUA (EOS PM)". La órbita del TERRA está programada para que recorra la Tierra de norte a sur a través del ecuador durante la mañana, mientras que la del AQUA la recorre de sur a norte durante la tarde. De esta forma, los sensores MODIS recorren la superficie completa del planeta cada uno o dos días, adquiriendo datos en 36 bandas espectrales o grupos de longitud de onda. Los rangos de longitudes de onda oscilan entre $0,4 \mu m$ hasta $14,4 \mu m$. De los 36 canales, 2 tienen una resolución de $250 m$ por píxel, 5 tienen $500 m$ por píxel y el resto $1 km$ por píxel. Los 7 primeros canales, los de más resolución, están orientados al estudio del suelo, los nueve restantes al estudio del océano y el resto a estudios atmosféricos.

En la Tabla 14 se muestran las longitudes de onda de bandas de sensores de Thematic Mapper, TM, de LANDSAT, MODIS de TERRA y AQUA y AVHRR de NOAA utilizados en la caracterización de sequías, sensores térmicos aparte. La correspondencia entre ellas no es exacta ni tampoco la disponibilidad de información en las regiones del espectro.

Tabla 14. Longitud de onda y bandas de sensores Landsat TM, MERIS, MODIS y AVHRR

Landsat TM		MERIS		MODIS		AVHRR 3		Región
λ (nm)	Banda	λ (nm)	Banda	λ (nm)	Banda	λ (nm)	Banda	
450-520	B1	433-453	B2	459-479	B3			Azul
530-600	B2	550-570	B5	545-565	B4			Verde
630-690	B3	674-689	B8	620-670	B1	580-680	B1	Rojo
760-900	B4	757-764	B11	841-876	B2	730-980	B2	Infrarrojo cercano
		845-885	B13					Infrarrojo cercano
				1.230-1.250	B5			Infrarrojo cercano
1.550-1.750	B5			1.628-1.654	B6	1.580-1.630	B3a	Infrarrojo medio
2.090-2.350	B7			2.105-2.155	B7			Infrarrojo medio

2.5.1 Índice de Estrés de Humedad, Moisture Stress Index (MSI)

Cuando disminuye la humedad de la planta, aumenta la reflectividad en el infrarrojo medio (ρ_{IRM}) de manera más nítida que en el cercano (ρ_{IRC}). Un primer índice de los cambios de humedad en la planta y del estrés hídrico sería entonces el cociente, MSI , entre la reflectividad de ambos sectores del espectro, infrarrojo medio e infrarrojo cercano. (Cohen, 1991; Rock et. al., 1986; Tucker, 1980).

Ec. 2-56. Índice MSI

$$MSI = \frac{\rho_{IRM}}{\rho_{IRC}}$$

A partir de este índice se han identificado daños en la vegetación causados por plagas, lluvia ácida e identificación de tipos de cubierta para explotaciones mineras. Sin embargo, Hunt y Rock (1986) destacan su insuficiencia para identificar situaciones de estrés hídrico y sequía en las plantas bajo una condición constante de superficie cubierta de vegetación. Cohen (1991) señala la dependencia de esta insuficiencia al tipo de vegetación. Harris et al. (2005) destacan la sensibilidad del índice para estimar el contenido de humedad en capas superficiales del suelo.

2.5.2 Índice Diferencial de Vegetación Normalizado o Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)

El índice *NDVI* proporciona información sobre el contenido de clorofila de la vegetación. El *NDVI* se calcula como cociente de la diferencia y suma de reflectividades del infrarrojo cercano (ρ_{IRC}) y del rojo en el visible (ρ_R).

Ec. 2-57. Índice *NDVI*

$$NDVI = \frac{\rho_{IRC} - \rho_R}{\rho_{IRC} + \rho_R}$$

Los valores del índice se encuentran dentro de rango -1 y 1 , siendo el habitual el comprendido entre $0,2$ y $0,8$ ²⁶. El índice se define de diferente manera y da resultados distintos en función del sensor y de las bandas consideradas (Tabla 14).

Ec. 2-58 En LANDSAT TM

Ec. 2-59. En MODIS

Ec. 2-60. En NOAA-AVHRR

$$NDVI = \frac{\rho_{B4} - \rho_{B3}}{\rho_{B4} + \rho_{B3}}$$

$$NDVI = \frac{\rho_{B2} - \rho_{B1}}{\rho_{B2} + \rho_{B1}}$$

$$NDVI = \frac{\rho_{B2} - \rho_{B1}}{\rho_{B2} + \rho_{B1}}$$

Cuanto mayor sea el contraste entre estas reflectividades del infrarrojo cercano y del rojo, mayor es el vigor de la vegetación que en una imagen corresponde a un mayor porcentaje de cubierta vegetal y más sana. En condiciones de estrés hídrico, la reflectividad es menor en el infrarrojo cercano, aumentando en el rojo, disminuyendo el contraste entre ambas bandas y los valores del índice. Por tanto, es un índice cuya aplicación inmediata es el seguimiento del estado de la vegetación. Pero no da una información estandarizada y su valor es función del tipo de vegetación, ecosistema, región y estación climática (Rahimzadeh-Bajgiran et al., 2012; Vicente-Serrano et al., 2006; Bayarjargal et al., 2006; Kogan, 2001; Chuvieco, 1996).

Tanto en condiciones de sequía como en ambientes áridos y semiáridos el agua se convierte en un factor limitante del crecimiento y del estado de la planta. Este contenido de agua presentará entonces una correlación positiva con el contenido de clorofila y, a su vez, con el *NDVI*. Consecuentemente, con el contenido de agua en el suelo, con la lluvia y con los indicadores de sequía (Peters et al, 2002). Sin embargo, se han destacado varias carencias.

En primer lugar, se ha destacado que el *NDVI* responde al contenido de clorofila en la planta y no estrictamente al estrés derivado de la falta de agua en la planta. Kogan (2001) destaca la necesidad de combinar el uso de este índice con otros basados en la reflectancia de bandas térmicas para distinguir las situaciones de falta de agua de otras situaciones climáticas.

A pesar del buen grado de correlación que presenta con la lluvia y la humedad del suelo, la señal del *NDVI* se retrasa respecto al momento en el que llueve y parece mostrar mejor relación con el contenido de agua acumulado en el suelo que con la lluvia caída directamente. Se ha descrito también que es escasamente sensible a las lluvias caídas con posterioridad a la etapa de crecimiento de la planta y a las lluvias

²⁶ Manual ENVI en http://geol.hu/data/online_help/Vegetation_Indices.html#wp1145034



altas, quizás debido a un umbral de consumo de la planta. El amplio conjunto de factores de los que depende la relación entre *NDVI* y disponibilidad de agua englobaría factores fisiológicos, edáficos, hidrológicos y climáticos (Rahimzadeh-Bajgiran et al., 2012; Bayarjargal et al., 2006; Vicente-Serrano et al., 2006).

En la práctica, la respuesta de un área agrega la de diferentes tipos de vegetación y la del suelo. La hipótesis de contribución lineal de los diferentes tipos de vegetación en el valor del *NDVI* se puede aceptar cuando la fisiología de las plantas es parecida, tal como ocurre en áreas boscosas o tropicales. No ocurre así en áreas de vegetación dispersa arbustiva o de sabana, con estrategias y respuestas diferentes ante la escasez de agua y con una contribución no lineal en una respuesta agregada (Sellers, 1985).

El valor del índice aumenta por aumento de la reflectividad del infrarrojo cercano y disminución de la del rojo y, por tanto, cuando aumenta la densidad de la vegetación o se desarrolla la estructura de la planta. En general se describen cambios en la actividad fotosintética y transpiración, en la densidad y en el grado de cobertura vegetal (Sellers, 1985). Esta variación se da con carácter estacional y plurianualmente, aunque si bien hay diferentes maneras de filtrar una fluctuación cíclica, no ocurre lo mismo con el tratamiento de las tendencias plurianuales que hacen heterogénea la serie temporal de *NDVI*. González-Alonso y Cuevas (2004) estudiaron la dependencia del índice respecto a la estacionalidad y a la ocurrencia de las sequías con imágenes NOAA-AVHRR en la parte española de la Península Ibérica y durante el periodo 1987-2001. Procesaron más de 5.000 imágenes a una resolución de 1 km, concluyendo la existencia de una tendencia al aumento de la actividad vegetativa de las plantas en España durante estos casi 15 años.

Este índice ha sido aplicado en España independientemente o en combinación con otras fuentes de información para la alerta temprana y la identificación de sequías. Vicente Serrano (2007) estudió la evolución del impacto de las sequías en la cuenca del Ebro utilizando índices de vegetación a partir de imágenes NOAA-AVHRR y mapas IPE. Encuentra una fuerte dependencia de la sequía respecto a los tipos de usos de suelo. Frantzova et al. (2010) describen el comportamiento del *NDVI* para diferentes usos de suelo. García et al (2007) se basaron en la relación lineal entre la temperatura superficial (*LST*, Land Surface Temperature) y el índice de vegetación de diferencia normalizado (*NDVI*) de imágenes MODIS para derivar otros tres índices con los que estudiar las sequías en cuencas del sureste semiárido peninsular.

2.5.2.1 Anomalía del índice *NDVI* (*NDVIA*)

El índice *NDVI* tiene un comportamiento estacional por lo que la definición de anomalías respecto a una media mensual se ha utilizado como indicador de sequía (Lin et. al., 2010; Bayarjargal et al., 2006). Siendo *k* el orden del índice en una serie mensual de imágenes y $\mu_{NDVI,j}$ la media de los *NDVI* correspondientes al mes *j*,

Ec. 2-61. Anomalía del índice *NDVI*

$$NDVIA_k = NDVI_k - \mu_{NDVI,j}$$

González-Alonso et al. (2001) y Vázquez et al. (2001) definieron anomalías para el estudio de la sequía del año 2000 en España como cocientes (%) entre el valor del

índice *NDVI* máximo de 10 días del año 2000 y el correspondiente medio de la misma decena durante el periodo 1993-1999. Utilizaron imágenes NOAA-AVHRR y concluyeron que las áreas afectadas fueron las de Baleares, Comunidad Valenciana, Murcia, Almería, y en menor medida, de Aragón, Cataluña, la cornisa Cantábrica, Huelva, Cádiz y Cáceres.

De cualquier manera, el factor clave en la estimación de las anomalías es la estimación de estadísticos como medias suficientemente consistentes, aspecto sobre el que aparecen dudas derivadas de escasez de información disponible y de la propia dinámica de la vegetación ya comentada en el apartado anterior o de la dinámica de alteraciones en los usos de suelo.

2.5.2.2 Índice de Vegetación Estandarizado/Standard Vegetation Index (SVI)

Las distintas magnitudes de variabilidad de las anomalías inducen al uso de un índice estandarizado considerando a la desviación típica como medida de la variabilidad. El índice *SVI* es la probabilidad de ocurrencia de un valor del *NDVI* en una época o mes del año. Se calcula independientemente en cada píxel usando la normal o la *t* de Student como funciones de distribución. Dada la estacionalidad del índice *NDVI* se consideran los valores medios y las desviaciones típicas de cada estación climática o de cada mes²⁷ (Peters et al., 2002).

Ec. 2-62. Índice SVI

$$z_k = \frac{NDVI_k - \mu_{NDVI,j}}{\sigma_{NDVI,j}}; \quad SVI_k = P(Z \leq z_k)$$

donde z_k es el valor estandarizado del $NDVI_k$ del momento k del mes j , cuyo valor medio es $\mu_{NDVI,j}$ y desviación típica $\sigma_{NDVI,j}$. En Peters et al. (2002) se clasifican los estados de humedad de la vegetación según los intervalos de la Tabla 15.

Tabla 15. Estado de la vegetación en función de SVI

Estado de la vegetación	Valor SVI
Muy pobre	$0,00 \leq SVI \leq 0,05$
Pobre	$0,05 < SVI \leq 0,25$
Medio	$0,25 < SVI \leq 0,75$
Bueno	$0,75 < SVI \leq 0,95$
Muy Bueno	$0,95 < SVI \leq 1,00$

Después de comparar los indicadores de sequía con las estimaciones de este índice, Peters et al. (2002) concluyen que el SVI es útil para identificar la aparición, extensión, intensidad y duración del estrés de la vegetación. Destacan además su sensibilidad al cambio de condiciones climáticas en cortos periodos de tiempo y su idoneidad para ser utilizado en combinación con otros índices de sequía. La técnica filtra la heterogeneidad inducida por cambios estacionales de la vegetación, facilitando la

²⁷ <http://casde.unl.edu/imagery/svi/index.php>



CEDEX

interpretación de los registros históricos y la diferenciación entre los tipos de vegetación.

2.5.2.3 Índice de Estado de la Vegetación/Vegetation Condition Index (VCI)

La variabilidad del *NDVI* es función de las características del entorno. En una región semiárida un valor de 0,4 es indicativo de un excelente estado de vegetación; no así en un territorio de vegetación densa propio de un clima húmedo, donde indicaría mal estado. El índice de estado de la vegetación *VCI* caracteriza su contenido de humedad estandarizando el índice *NDVI* por el rango de valores de la serie temporal de cada píxel (Singh et al., 2003; Kogan, 1995a, 1995b, 1997 y 2001). En un paso *k* de la serie total respecto al mes, semana o decena *j*,

Ec. 2-63. Índice VCI

$$VCI_k = \frac{(NDVI_k - NDVI_{\min,j})}{(NDVI_{\max,j} - NDVI_{\min,j})}$$

La operación anterior homogeniza la variabilidad del *NDVI* bajo diferentes condiciones climáticas. Sin embargo, se ha encontrado que la variabilidad del *NDVI* es también inversamente proporcional a la escala del valor del *NDVI*, encontrándose en áreas semiáridas un aumento de la variabilidad del índice conforme toma menores valores (Vicente-Serrano et al., 2006; Huete et al., 1997), aspecto que no resuelve la operación anterior.

El índice *VCI* se usa como indicador de sequía, pero no recoge todas las acciones que condicionan la respuesta de la vegetación como ya se indicó al describir el índice *NDVI*. Singh et al. (2003) y Kogan (1995a, 1995b, 1997 y 2001) sugieren el uso combinado con otros índices de temperatura para detectar casos en los que bajas temperaturas de primavera induzcan bajos valores de *VCI* al retrasar el desarrollo de la planta sin haberse dado condiciones de sequía. Se propone un índice del estado térmico de la vegetación, *TCI*, en función de la temperatura de brillo, *BT*, también estandarizado por el dominio de reflectividades en esta región del espectro. Tomando los valores máximo y mínimo en cada píxel de la serie plurianual del mismo mes, semana o decena,

Ec. 2-64. Índice TCI

$$TCI_k = \frac{(BT_{\max,j} - BT_k)}{(BT_{\max,j} - BT_{\min,j})}$$

Durante la época de desarrollo de la planta, bajas temperaturas de brillo son indicativas de sequía. Y mediante una ponderación, un índice de salud de la vegetación, *VH*,

Ec. 2-65. Índice VH,

$$VH_k = VCI_k - TCI_k$$

2.5.2.4 Índice Ajustado de Vegetación al Suelo o Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI)

El uso de los índices de vegetación en zonas áridas y semiáridas estaría justificado por ser el contenido de agua el factor limitante del crecimiento de las plantas. Sin embargo, la densidad y el grado de cobertura vegetal son variables en el tiempo y lo será la

reflectividad compuesta del suelo y de la vegetación, cuyas curvas de reflectividad son esencialmente distintas (Figura 2) (Sellers, 1985). Otras fuentes de heterogeneidad en la serie temporal de reflectividades se asocia a los procesos de degradación del suelo y a la actividad humana (Vicente-Serrano et al., 2006; Washington-Allen et al., 2004).

El índice SAVI, filtra la reflectividad del sustrato incorporando el parámetro (L) para ajustar el índice a la reflectividad promedio del suelo. Su valor aproximado es de 0,5. Esta corrección ampliaría el campo de aplicación de los índices de vegetación a regiones áridas y semiáridas (Washington-Allen et al., 2004; Huete et al., 1997; Huete, et. al. 1994; Huete, 1987).

Ec. 2-66. Índice SAVI

$$SAVI = \frac{\rho_{IRC} - \rho_R}{\rho_{IRC} + \rho_R + L} (1 + L)$$

2.5.3 Índice Diferencial de Agua Normalizado o Normalized Difference Water Index (NDWI)

El índice *NDWI* es la diferencia normalizada entre las bandas del infrarrojo cercano (ρ_{IRC}) y del infrarrojo de onda corta (ρ_{IROC}). Estas bandas espectrales son sensibles a cambios en el contenido de agua de la planta y en los espacios intercelulares del mesófilo esponjoso de las hojas de la cubierta vegetal (Gu et. al., 2007; Gao, 1996). En función del sensor, el índice se elabora de distinta manera. En Gao (1996) se usa ρ_{IROC} en 1.240 nm, banda 5 en Landsat TM; en Gu et. al. (2007), en 2.130 nm, banda 7 en MODIS; Rhee et al. (2010), en las bandas 5, 6 y 7 del TRMM.

Ec. 2-67. Índice NDWI

$$NDWI = \frac{\rho_{IRC} - \rho_{IROC}}{\rho_{IRC} + \rho_{IROC}}$$

Ec. 2-68. En LANDSAT TM

$$NDWI = \frac{\rho_{B4} - \rho_{B5}}{\rho_{B4} + \rho_{B5}}$$

Ec. 2-69 En MODIS

$$NDWI = \frac{\rho_{B2} - \rho_{B7}}{\rho_{B2} + \rho_{B7}}$$

Con valores entre -1 y +1. Valores bajos serían indicativos de condiciones de sequía (Gu et. al., 2007). Rahimzadeh-Bajgiran et al. (2012) subrayan el que identifica condiciones de severo estrés hídrico en las plantas. El índice detecta estados de la vegetación como la desecación y la marchitez. Es por tanto un indicador de sequía más sensible y de respuesta más rápida que el *NDVI*. Rhee et al. (2010) concluyen que no produce resultados significativamente mejores que el *NDVI* en regiones áridas. Como en el caso del índice *NDVI* y el *VCI*, también se define un *NDWI* escalado considerando los valores máximo y mínimo (Rhee et al., 2010).

2.5.3.1 Anomalía del índice NDWI (NDWIA)

Como en el caso del índice *NDVI*, Lin et. al. (2010) también usa las anomalías del índice *NDWI* como descriptivo de las sequías. Siendo k el orden del índice en una serie mensual de imágenes y $\mu_{NDWI,j}$ la media de los *NDWI* correspondientes al mes j ,

Ec. 2-70. Anomalía del índice *NDWI*

$$NDWIA_k = NDWI_k - \mu_{NDWI,j}$$



Renza et. al. (2010) definen una anomalía combinada mensual del *NDVI* en una combinada respecto al *NDWI* medio mensual, $\mu_{NDWI,j}$

Ec. 2-71. Índice *NDVID*

$$NDVID_k = NDVI_k - \mu_{NDWI,j}$$

2.5.3.2 Índice de Sequedad en Vegetación/Vegetation Dryness Index (VDI)

La relación entre el *NDVI* y *NDWI* se suele representar por una nube de puntos en un diagrama de dispersión con orientación positiva (Rahimzadeh-Bajgiran et al., 2012). Como describen los autores, esta nube se puede encuadrar en un trapezoide que permite distinguir entre las propiedades de la vegetación y del contenido en agua. Siendo la correlación entre *NDVI* y *NDWI* positiva, el vértice superior izquierdo del trapezoide simboliza un estado de vegetación pobre con alto contenido de agua; el vértice inferior izquierdo, un estado de vegetación pobre con bajo contenido de agua; el vértice superior derecho del trapezoide, un estado de vegetación óptimo con alto contenido de agua; el vértice inferior derecho, un estado de vegetación óptimo con bajo contenido de agua. Desde el centro de gravedad de la nube de puntos, denominado punto C, se define el ancho vertical del trapezoide y en este segmento el punto A en la línea superior (húmeda), y el B en la inferior (seca), el índice de sequedad es,

Ec. 2-72. Índice *VDI*

$$VDI = \frac{AC}{AB} = 1 - \frac{BC}{AB}$$

VDI varía entre 0 y 1, reduciéndose para condiciones húmedas y aumentando para las secas. Es un índice gráfico de elaboración sofisticada a pesar de apoyarse en una base física. Sin embargo, en Rahimzadeh-Bajgiran et al. (2012) no se recomienda su uso para la identificación de situaciones de estrés hídrico en la vegetación por su dependencia a los usos de suelo.

2.5.3.3 Índice Térmico de Sequedad en la Vegetación o Temperature Vegetation Dryness Index (TVDI)

Se define el índice de Déficit Hídrico o *Water Deficit Index (WDI)* como el de evapotranspiración real respecto a la potencial. Este índice está inversamente correlacionado con la humedad del suelo y depende de la temperatura de la superficie, suelo y vegetación.

Ec. 2-73. Índice *WDI*

$$WDI = 1 - \frac{ETR}{ETP}$$

El cálculo del *WDI* se enfrenta a la parametrización compleja de la *ETR*. Si se considera el trapezoide anterior de la nube de puntos entre *NDVI* y *NDWI*, la máxima *ETR* se dará en el borde superior y la mínima en el inferior que representan las condiciones húmedas y secas, respectivamente. De la misma manera se define la relación entre *NDVI* y la diferencia entre las temperaturas del suelo y aire, aunque ahora la correlación es negativa y los bordes secos y húmedos invierten sus

posiciones. Siendo ΔT la diferencia entre temperaturas de superficie y del aire, se tendrían ecuaciones de borde de la nube de puntos

Ec. 2-74. Parámetros de borde en WDI

$$\text{Mínima ETR. Borde seco } \Delta T = a + bNDVI$$

$$\text{Máxima ETR. Borde húmedo } \Delta T = a' + b'NDVI$$

Simplificadamente se ha definido el Índice térmico de Sequedad de la Vegetación, *Temperature Vegetation Dryness Index*, *TVDI*, suponiendo una temperatura del aire constante. Queda la temperatura de superficie, combinación de las correspondientes a la cubierta vegetal y al suelo. Este índice está inversamente correlacionado con la humedad del suelo. La relación entre la temperatura superficial terrestre y el régimen de humedad en el suelo permite detectar la aparición de las condiciones de sequía antes de que se produzcan efectos fuertemente negativos en la vegetación y los cultivos. Es, por tanto, un indicador temprano de las condiciones de estrés hídrico de la vegetación y las condiciones de humedad del suelo. Siendo *LST* la temperatura de superficie

Ec. 2-75. Índice *TVDI*

$$\left. \begin{aligned} TVDI &= \frac{LST - LST_{\min}}{LST_{\max} - LST_{\min}} \\ LST_{\max} &= a + bNDVI \\ LST_{\min} &= a' + b'NDVI \end{aligned} \right\} \Rightarrow TVDI = \frac{LST - a' + b'NDVI}{a + bNDVI - (a' + b'NDVI)}$$

Siendo los parámetros *a*, *b*, *a'* y *b'* los de las rectas de regresión *LST_{max}* y *LST_{min}* del «borde seco» y «borde húmedo» del dominio de posibles valores que definen los autores. El borde seco representa la tasa de evapotranspiración mínima (zonas secas), mientras que el borde húmedo da su máximo valor (zonas sin restricción de agua) (Rahimzadeh-Bajgiran et al., 2012; García et al., 2007; Sandholt et al., 2002; Verstraeten, 2001; Moran et al., 1994).

Este índice cuantifica la tasa relativa de flujo de calor latente o evapotranspiración con valores que oscilan entre 0 y 1. El valor 0 es indicativo de superficies completamente húmedas y el valor 1, de superficies secas sin flujo de calor latente.

Las simplificaciones como la de temperatura del aire constante limitan el uso de este índice. En Rahimzadeh-Bajgiran et al. (2012) se refieren recomendaciones de uso a áreas no extensas, de topografía suave o con correcciones basadas en el modelo de elevaciones. Estos autores concluyen que las correcciones introducidas son de la mayor importancia para el uso de este índice después de analizar la correlación con la lluvia y humedad del suelo.

2.5.3.4 Índice Térmico de Estado de la Vegetación o Vegetation Temperature Condition Index (VTCI)

Wang et al. (2001) han utilizado el índice *VTCI* para el seguimiento de sequías en planicies de China. Está directamente correlacionado con la humedad del suelo.



CEDEX

Considerando el orden k en la serie temporal completa y el subíndice j relativo al mes, semana o decena, queda

Ec. 2-76. Índice $VTCI$

$$VTCI_k = \frac{LST_{máx,j} - LST_k}{LST_{máx,j} - LST_{mín,j}}$$

2.5.3.5 Índice del Estado de Agua en la Vegetación o Vegetation Condition Water Index (VCWI)

Procede del escalado del $NDWI$ al considerar sus valores máximos y mínimos. Los valores de este índice se encuentran entre 0 y 1.

Ec. 2-77. Índice $VCWI$

$$VCWI_k = \frac{(NDWI_k - NDWI_{mín,j})}{(NDWI_{máx,j} - NDWI_{mín,j})}$$

2.5.4 Índice Diferencial de Sequía Normalizado o Normalized Difference Drought Index (NDDI)

El índice $NDDI$ es una combinación entre los $NDVI$ y $NDWI$. Respecto al uso del $NDVI$, corregiría el retraso existente entre la falta de lluvia y la respuesta de la vegetación incorporando el $NDWI$, de respuesta más rápida y con mayor sensibilidad a las condiciones de sequía de verano. El índice $NDDI$ finalmente compuesto depende de las bandas roja del visible (ρ_R), infrarrojo cercano (ρ_{IRC}) e infrarrojo medio de onda corta (ρ_{IROC}) (Gu et al., 2007) , bandas 1, 2 (ó 5) y 7 en el MODIS respectivamente.

Ec. 2-78. Índice $NDDI$ ²⁸

$$NDVI = \frac{\rho_{857} - \rho_{645}}{\rho_{857} + \rho_{645}}; NDWI = \frac{\rho_{857} - \rho_{2130}}{\rho_{857} + \rho_{2130}}; NDDI = \frac{(NDVI - NDWI)}{(NDVI + NDWI)}$$

2.5.4.1 Índice Diferencial de Sequía Normalizado Escalado o Scaled Normalized Difference Drought Index (SNDDI)

El valor escalado entre 0 y 1 del índice $NDDI$, $SNDDI$, se obtiene utilizando los valores máximos y mínimos (Rhee et al., 2010). Siguiendo el convenio del orden k en la serie temporal y el subíndice j del mes, semana o decena de la serie plurianual.

Ec. 2-79. Índice $NDDI$ escalado

$$SNDDI_k = \frac{(NDDI_{máx,j} - NDDI_k)}{(NDDI_{máx,j} - NDDI_{mín,j})}$$

Siendo un indicador de humedad en el suelo, su evolución es sensible a los cambios de uso de suelo y a los incendios.

²⁸ <http://vegdrj.unl.edu/ExperimentalProducts.aspx>

2.5.4.2 Índice Normalizado de Sequía en Superficie o Normalized Surface Drought Index, (NSDI)

La aplicación del índice *NDDI* a territorio español se vio limitada en su momento por la falta de disponibilidad de las imágenes del sensor MODIS. Sí se disponía de imágenes MERIS, pero sin la banda de infrarrojo de onda corta (ρ_{IROC} , en banda 7 del MODIS), necesaria para estimar el índice *NDWI*. Se propuso entonces un nuevo índice *NSDI* (*Normalized Surface Drought Index*) con una banda alternativa al infrarrojo de onda corta situada en el entorno a los 560 nm (banda 5 del MERIS). En ésta, la absorción de la clorofila es mínima y la reflectancia del agua es máxima. El índice *NDVI* adaptado a las bandas del MERIS se calcula con sus bandas 8 y 13, ρ_{ME8} y ρ_{ME13} , respectivamente; el *NDWI*, con las bandas 5 y 11, ρ_{ME5} y ρ_{ME11} , respectivamente (Rodríguez-Fontal, 2011). El índice *NSDI* queda como,

Ec. 2-80. Índice NSDI

$$NDVI = \frac{\rho_{ME13} - \rho_{ME8}}{\rho_{ME13} + \rho_{ME8}} ; NSDI = \frac{NDVI - NDWI}{NDVI + NDWI}$$

$$NDWI = \frac{\rho_{ME11} - \rho_{ME5}}{\rho_{ME11} + \rho_{ME5}}$$

La información obtenida a través de este indicador de sequía ha servido de apoyo para la interpretación de los indicadores de sequía publicados mensualmente por la SPUSA-DGA. Además, se están aplicando metodologías para la identificación de zonas inundables mediante técnicas de teledetección. Mediante las imágenes del sensor MERIS y tomando como base la respuesta espectral del agua medida por el sensor en las bandas 14 ó 15 en el rango espectral del infrarrojo cercano, es posible detectar la presencia de agua para delimitar las zonas inundables. Con el intervalo temporal semanal de las imágenes MERIS se puede hacer un seguimiento de las zonas inundables y potenciar la modelación y pronóstico de episodios de inundación como se hizo con las inundaciones de febrero de 2010 en el río Guadalete. Respecto a las sequías, el área inundada y encharcada constituye un índice de sequía en humedales por lo que se ha implementado en la Albufera de Valencia y en las Tablas de Daimiel.

2.5.5 Índice Mejorado de Vegetación o Enhanced Vegetation Index (EVI)

El índice *EVI* da una señal del vigor de la vegetación pero habiendo reducido el efecto del ruido inducido por efectos atmosféricos y de la superficie del suelo. Este ruido produce distorsiones en las fluctuaciones del índice de vegetación. *EVI* permite caracterizar la masa vegetal y su estado utilizando las reflectividades del rojo (ρ_R), azul (ρ_A) e infrarrojo cercano (ρ_{IRC}), es decir, las bandas B3, B1 y B4 del Landsat TM y las B1, B3 y B2 (ó B5) del MODIS, respectivamente (Glenn et al., 2008; Huete et. al., 2002).

Ec. 2-81. Índice EVI

$$EVI = G \frac{(\rho_{IRC} - \rho_R)}{(\rho_{IRC} + (C_1 \cdot \rho_R - C_2 \cdot \rho_A) + L)} = 2,5 \frac{(\rho_{IRC} - \rho_R)}{(\rho_{IRC} + (6 \cdot \rho_R - 7,5 \cdot \rho_A) + 1)}$$



Siendo G el factor de ganancia con valor 2,5; L , el parámetro de ajuste de la dispersión de superficie con valor 1; $C1$, $C2$ los coeficientes de resistencia a las variaciones de aerosol, con valores 6 y 7,5 respectivamente. Glenn et al. (2008) destacan el mayor peso en la formulación del EVI dado a ρ_{IRC} evitando el problema de saturación del $NDVI$ con vegetación densa y mejorando la sensibilidad a la actividad de la planta.

2.5.5.1 Índice Escalado de Estado EVI de la Vegetación o Vegetation Condition EVI Index ($VCEI$)

EVI presenta estacionalidad y variabilidad espacial en función del tipo de uso de suelo (Huete et al. 2002). Vidaillet (2012) planteó el uso de 3 índices ($VCEI$, $VCWI$ y $NDDEI$) basados en el índice de vegetación mejorado EVI de Huete et. al. (2002). Es una alternativa al índice $NDVI$ y a las modificaciones derivadas del VCI de Kogan (1995) y del $NDDI$ de Gu et. al., (2007). El índice $VCEI$ (*Vegetation Condition EVI Index*) procede de la estandarización del índice EVI considerando los valores máximo y mínimo de la serie plurianual de cada mes, decena o semana j . Su rango de valores está comprendido entre 0 y 1. En el paso k de la serie temporal,

Ec. 2-82. Índices $VCEI$

$$VCEI_k = \frac{(EVI_k - EVI_{mín,j})}{(EVI_{máx,j} - EVI_{mín,j})}$$

Es más sensible a los cambios del estado de la vegetación que el $NDDI$ y Vidaillet (2012) recomienda su uso tanto en el estudio de sequías como en el análisis de rendimiento de cosechas.

2.5.5.2 Índice Diferencial de Sequía Vegetativa Normalizado o Normalized Difference Drought EVI Index ($NDDEI$)

El índice $NDDEI$ es una variante del $NDDI$ de Gu et al. (2007). Tiene una alta sensibilidad para detectar las variaciones espaciales del vigor de la vegetación en condiciones de sequía. Se ha aplicado al estudio de las sequías en la Península Ibérica durante el periodo 2000-2010 con imágenes MODIS (Vidaillet, 2012).

Ec. 2-83. Índice $NDDEI$

$$NDDEI = \frac{(EVI - NDWI)}{(EVI + NDWI)}$$

2.5.6 Índice de Respuesta a la Sequía de la Vegetación o Vegetation Drought Response Index ($VegDRI$)

El índice $VegDRI$ fue propuesto²⁹ por el NDMC y EROS³⁰ Center. Se elabora empíricamente e integra el índice $NDVI$ con los basados en aproximaciones climáticas, $PDSI$ e IPE , y el conocimiento de las características biofísicas medioambientales como los tipos de uso de suelo, la cantidad de agua disponible en el suelo, el % de superficie

²⁹ http://www.drought.gov/workshops/remotesensing/abstracts/brian_wardlow2.pdf

³⁰ USGS Earth Resources Observation and Science

regada y factores ecológicos de una zona (Brown et al., 2008). El producto final son mapas de 1 km de resolución en escalas nacionales y continentales (EE.UU.). El indicador caracteriza la intensidad mediante siete categorías diferentes de estrés de la vegetación basado en el esquema de clasificación de sequía del *PDSI* (Palmer, 1965) y permite analizar la variabilidad espacial de las sequías.

2.5.7 Síntesis Parcial

La teledetección es una herramienta útil para la descripción del estado de la vegetación y de su contenido de agua cuando éste sea un factor limitante. Por esto se han venido utilizando una serie de indicadores derivados del conocimiento teórico de la energía reflejada por la superficie de la planta en varias regiones del espectro electromagnético. Mediante una combinación adecuada de estas respuestas se obtienen índices con un rango suficientemente amplio y sensible para ser utilizado bajo diferentes condiciones climáticas y con diferentes tipos de vegetación.

Desde los años 70 la teledetección se ha utilizado para el seguimiento e identificación de situaciones de sequía. La gran ventaja del uso de la teledetección reside en captar información completa del territorio, en diferentes escalas temporales y espaciales, regional, nacional o global. Por el contrario, los indicadores de sequía climáticos o hidrológicos se han apoyado tradicionalmente en la información registrada en las clásicas redes hidrometeorológicas cuyos sensores terrestres suelen estar instalados en lugares de fácil acceso y habitados, dejando descubierta una parte importante del territorio. Es el caso de las zonas montañosas hasta donde se extrapola la información registrada en valles y lugares accesibles.

La disponibilidad de imágenes de la teledetección se extiende a los últimos 40 años. Esto abriría la posibilidad de realizar estudios retrospectivos durante un periodo temporal suficientemente amplio. Pero la mejora y evolución de la tecnología disponible con cambio de sensores, de la resolución y de la frecuencia de paso, hacen inicialmente heterogénea este volumen de información. Es decir, en la práctica no se dispone de casi 40 años de imágenes captadas por un mismo sensor, sino que los periodos temporales con información captada homogénea son más cortos. Esto tiene consecuencias en la elaboración de series temporales de índices y en la definición de anomalías respecto a parámetros estadísticos como la media y desviación típica.

El fundamento de los indicadores de sequía basados en teledetección reside en captar una señal reflejada en distintas bandas del espectro de energía de los que inferir la actividad fotosintética y el vigor de la vegetación. Esta información captada se considera relacionada con el contenido de agua en las hojas y estructura de la planta y con otras variables como la precipitación o el contenido de agua en el suelo, siempre que la disponibilidad de agua sea la limitante de la actividad de la planta.

Existe un amplio número de índices utilizados en la identificación de sequías. En la mayoría de artículos y trabajos consultados se describen buenos ajustes entre los índices de teledetección y las condiciones de sequía. En algunos casos hay falta de acuerdo entre ambos destacando una serie de inconvenientes de carácter técnico en el diseño de los indicadores. Una primera cuestión es que la señal captada es mezcla de la reflejada por diferentes tipos de suelo y vegetación, con diferente estado y densidad de ocupación. Hay entonces en los indicadores parámetros correctores de la mezcla de



CEDEX

reflectividades así como otros relacionados con la dispersión y absorción de energía en la atmósfera. Siendo diferentes las curvas espectrales de suelo y vegetación se entienden los problemas de interpretación que surgen. Se describen además desfases entre el momento de la lluvia y la actividad de la planta y una reacción distinta de la planta a la lluvia en función de su estado de desarrollo y de la época del año en que se produce. Los indicadores deben ser suficientemente sensibles a los niveles de estrés en la planta para cuantificar adecuadamente la intensidad de una sequía y responder con el mínimo desfase a la disponibilidad de agua. Y al contrario, existen umbrales de recurso hídrico, superados los cuales la planta no muestra sensibilidad.

Ninguno de los indicadores parece por tanto constituir una solución universal. Al contrario, se ha destacado la dependencia a las condiciones de experimentación y al carácter árido, semiárido o húmedo del territorio, a los tipos de vegetación, a la densidad de los usos de suelo con una parametrización dependiente de la consideración de determinados aspectos cuya comprensión exige especialización en el tratamiento de imágenes procedentes de sensores remotos y complica su uso.

El conjunto de indicadores descritos en los apartados anteriores se han seleccionado por la sencillez operativa ya que la mayoría de ellos se elaboran con información reflejada en el visible e infrarrojo. Se dispone además de suficientes publicaciones que los describen. La Tabla 16 muestra un resumen de las principales conclusiones sobre su uso extraídas de la bibliografía ya referida.

Tabla 16. Resumen de los indicadores basados en teledetección

Indicador	Fortalezas	Debilidades
MSI , de estrés de humedad, moisture stress index. Cociente entre ρ_{IRM} y el ρ_{IRC}	<ul style="list-style-type: none">• Sencillez en la formulación	<ul style="list-style-type: none">• Sin sensibilidad suficiente para las sequías
NDVI , diferencial de vegetación normalizado, normalized difference vegetation index. Combinación de bandas espectrales entre ρ_{IRC} y ρ_R	<ul style="list-style-type: none">• Sencillez de la formulación• Ampliamente utilizado y base conceptual de otros índices• Se obtiene a partir de imágenes de distintos sensores (Landsat, Modis, MERIS ...)• Disponibilidad de publicaciones• Buenas correlaciones con lluvia y humedad del suelo• Uso en distintas escalas temporales• Definición de anomalías NDVIA respecto a valores medios para filtrar las componentes cíclicas estacionales	<ul style="list-style-type: none">• Varía en función de la región, condiciones climáticas y estacionalidad• No es indicador directo de la lluvia o humedad del suelo. La relación depende de la estación, fase de crecimiento de la planta• Heterogeneidades en las series plurianuales

Indicador	Fortalezas	Debilidades
<p>SVI, de Vegetación Estandarizado, Standard Vegetation Index</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Estandarización en términos de probabilidad de ocurrencia. Filtra la estacionalidad y hace comparables resultados bajo diferentes condiciones • Eficaz indicador de la aparición, extensión, intensidad y duración de la sequía • Útil en sistemas de indicadores para mitigar los impactos de las sequías • Distintas escalas temporales: semanal, decenal y mensual • Se obtiene a partir de distintos sensores 	<ul style="list-style-type: none"> • Indicador de las condiciones climáticas a corto plazo • Anomalía del índice NDVI sobre el verdor; no se relaciona directamente con la lluvia o humedad del suelo por lo que depende de las condiciones climáticas
<p>VCI, de Estado de la Vegetación, Vegetation Condition Index</p> <p>TCI, de Estado Térmico de la Vegetación en función de la temperatura de brillo</p> <p>VH, de Vegetación ponderado de VCI y TCI</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Sencillez • Reduce las fuentes de heterogeneidad regionales o del tipo de vegetación • Capta fluctuaciones del NDVI debido a condiciones meteorológicas temporales y ecosistemas • Eficaz en la detección y seguimiento de las sequías en intensidad, duración e impacto en la vegetación • Eficaz en todo tipo de sequías, prolongadas, generalizadas, intensivas y bien definidas o cortas, muy localizadas y mal definidas • Se obtiene a partir de distintos sensores • Distintas escalas temporales: semanal, decenal y mensual • VH de sequía de la planta en desarrollo y bajas temperaturas de brillo 	<ul style="list-style-type: none"> • Desfase entre el déficit de lluvia y la respuesta del índice NDVI
<p>SAVI, ajustado de vegetación al suelo, Soil Adjusted Vegetation Index</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Incluye el factor suelo mejorando la interpretación de las condiciones de la vegetación en regiones semiáridas • Fuerte correlación con variables hidrológicas relacionadas con la humedad del suelo 	<ul style="list-style-type: none"> • Complejidad conceptual de los parámetros la formulación
<p>NDWI, diferencial de agua normalizado, normalized difference water index</p> <p>VDI, de sequedad de la vegetación</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Sencillez • Menor sensibilidad a los efectos atmosféricos que el NDVI • Mayor sensibilidad a la detección de sequías que el NDVI • Eficaz en la identificación de sequías • Definición de anomalías, NDWIA • Distintas escalas temporales: semanal, decenal y mensual • VDI, físicamente basado y sofisticado 	<ul style="list-style-type: none"> • No elimina la reflectancia del suelo • Sólo de sensores con ρ_{IROC} • VDI depende de los usos de suelo



Indicador	Fortalezas	Debilidades
TVDI , término de sequedad en la vegetación, temperature vegetation dryness index	<ul style="list-style-type: none"> • Se obtiene a partir de distintos sensores • La consideración de las temperaturas permite discriminar mejor situaciones de sequía • Es un indicador temprano de las condiciones de estrés hídrico de la vegetación y de la humedad del suelo • Distintas escalas temporales: semanal, quincenal, mensual • Presenta correlación inversa con la humedad del suelo. 	<ul style="list-style-type: none"> • Sofisticación con inclusión del término • Dificultad en la obtención del índice
WDI , Water Deficit Index	<ul style="list-style-type: none"> • Incorpora información térmica • Buena disponibilidad de información. • Detecta condiciones de sequía antes de que aparezcan los efectos negativos en vegetación y cultivos. Indicador temprano • Distintas escalas temporales: semanal, quincenal, mensual • Buena correlación con la humedad del suelo • Aplicable a zonas semiáridas cubiertas de superficies mixtas, vegetación y suelo desnudo 	<ul style="list-style-type: none"> • Estimación compleja • Compleja interpretación
VTCI , término de estado de la vegetación, vegetation temperature condition index	<ul style="list-style-type: none"> • Se obtiene a partir de distintos sensores • La consideración de las temperaturas permite discriminar mejor situaciones secas • Es un indicador temprano de las condiciones de estrés hídrico de la vegetación y de la humedad del suelo • Distintas escalas temporales: semanal, decenal y mensual • Utilizado en el seguimiento de sequías de planicies de EE.UU. 	<ul style="list-style-type: none"> • Se fundamenta en una base teórica muy robusta pero difícil de interpretar
NDDI , diferencial de sequía normalizado, normalized difference drought index	<ul style="list-style-type: none"> • Sencillez • Mayor sensibilidad como indicador frente a la sequía que los índices NDVI y NDWI • Escalado entre 0 y 1, SNDDI • Tiene estacionalidad por lo que se definen anomalías NDDIA • Distintas escalas temporales: semanal, decenal y mensual • Facilidad en la obtención del índice • Buena correlación con la lluvia y humedad del suelo 	<ul style="list-style-type: none"> • Combinación de dos índices: posible acumulación de errores • Es sensible a la estacionalidad • Sólo de sensores con ρ_{IROC}
NSDI , normalizado de sequía en superficie, normalized surface drought index	<ul style="list-style-type: none"> • Formulación adaptada. Mayor peso al índice de agua que al índice de vegetación invirtiendo el orden de los elementos en la ecuación para adaptarlo a España • Equivalencia entre los índices NDDI y NSDI 	<ul style="list-style-type: none"> • Combinación de dos índices: posible acumulación de errores • Es sensible a la estacionalidad

Indicador	Fortalezas	Debilidades
	<ul style="list-style-type: none"> • Mayor sensibilidad como indicador frente a la sequía que los índices NDVI y NDWI • Distintas escalas temporales: semanal, decenal y mensual • Facilidad en la obtención del índice. • Buena correlación con lluvia y humedad del suelo 	
<p>EVI, mejorado de vegetación, enhanced vegetation index</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Reduce el efecto del ruido inducido por la atmósfera y la superficie del suelo • Es más sensible a las variaciones de la cubierta vegetal que el NDVI • Distintas escalas temporales: semanal, decenal y mensual • Se obtiene a partir de distintos sensores • Facilidad en la obtención del índice • Buena correlación con la lluvia y humedad del suelo 	<ul style="list-style-type: none"> • Es sensible a la estacionalidad
<p>VCEI, escalado de estado EVI de la vegetación, vegetation condition EVI index</p> <p>VCWI, del estado de agua en la vegetación, vegetation condition water index</p> <p>NDDEI, diferencial de sequía vegetativa normalizado, normalized difference drought EVI index</p>	<ul style="list-style-type: none"> • VCEI y VCWI son más sensibles al cambio de estado de la vegetación que los NDDI y NDDEI • VCEI y VCWI son sensibles a las condiciones de sequía • El índice NDDEI es más sensible para detectar las variaciones espaciales en los efectos de la sequía que VCEI y VCWI • Facilidad en la obtención del índice • Distintas escalas temporales: semanal, decenal y mensual • Buena correlación con la lluvia y humedad del suelo 	<ul style="list-style-type: none"> • VCWI y NDDEI solo de sensores con ρ_{IROC} • Son sensibles a la estacionalidad • Menor número de publicaciones respecto a otros
<p>VegDRI de Respuesta a la Sequía de la Vegetación, Vegetation Drought Response Index</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Necesario adiestramiento • Herramienta de seguimiento de las condiciones de la vegetación en tiempo real • Facilita el seguimiento y la toma de decisiones frente a la sequía • Útil para el análisis de los expertos 	<ul style="list-style-type: none"> • Elevado número de variables a considerar en su elaboración • Carácter cualitativo

3 IMPLEMENTACIÓN DE ÍNDICES EN ESPAÑA

3.1 SERIES REGIONALES DE PRECIPITACIÓN Y ESCORRENTÍA

Desde el punto de vista de los recursos hídricos, variables como la precipitación y escorrentía son de la mayor importancia. La primera constituye el principal ingreso de agua en el ciclo hidrológico. Se transforma en escorrentía en función de la acción de variables como la evapotranspiración potencial y de características estructurales como la capacidad de almacenamiento del suelo y acuífero o, con carácter general, sus propiedades hidrodinámicas. Esta transformación se caracteriza por la cantidad de escorrentía generada y por el desfase de su respuesta de los almacenamientos hidrológicos.

El estudio de variables como la precipitación y escorrentía ha sido objeto de las distintas evaluaciones de recursos hídricos. Actualmente se dispone de series mensuales de mapas comprendidos entre octubre de 1930 y septiembre de 2011 que pueden agregarse en las regiones que se consideren oportunas. Las lluvias mensuales se obtuvieron mediante interpolación de más de 10.000 series de registros históricos de la base de datos HIDRO (Quintas Ripoll, 1996). Las series fueron completadas mediante correlación bivariada con estacionarización previa. El procedimiento de interpolación tiene en cuenta el efecto orográfico y la disminución de la densidad de estaciones en altura (Álvarez-Rodríguez, 2011). La escorrentía se obtuvo mediante simulación utilizando la versión cuasi-distribuida del modelo de Témez implementado sobre el SIG-GRASS en SIMPA (Álvarez et al, 2005; Témez, 1977). Los parámetros del modelo dependen de información fisiográfica como los usos de suelo, las texturas, pendientes, litologías y la información derivada de la caracterización de las Masas de Agua Subterránea. Aparte de la escorrentía y precipitación, el modelo estima la evapotranspiración potencial y real, el estado de humedad del suelo, la recarga, la escorrentía directa, la descarga subterránea y la agregación de las dos últimas, escorrentía total (MAGRAMA, 2000b; Estrela et al. 1999; Ruiz García 1999).

Las sequías se definen en regiones en las que entran en conflicto los recursos y demandas de agua. Las regiones del SIEH se delimitan mediante la agrupación de cuencas hidrográficas y sistemas de explotación y se describen ampliamente en el apartado 3 “*Estructura y Fundamentos del Sistema de Indicadores de Estado Hidrológico*” del informe “*El Sistema de Indicadores de Estado Hidrológico, SIEH*” incluido como parte de los trabajos de la ficha nº 4 de la presente encomienda de gestión. Estas regiones constituyen una subdivisión territorial suficiente para estimar series temporales de valores medios de lluvia y escorrentía y estudiar en ellas las duraciones y frecuencias de los déficits de agua. Son un total de 62 en 505.000 km² de superficie de España (Figura 3).

Tabla 17. Estadísticos de las series anuales de precipitación regional. 1930/31-2010/11

Cuenca	Media	Desv.Típ.	Máx	mín	c25	c50	c75	CSesgo	τMK	pvalor
Miño-Sil	1243	261	1919	797	1049	1210	1381	0,71	-0,13	0,08
Cantábrico	1274	173	1781	848	1167	1255	1385	0,10	-0,15	0,04
Norte III	1451	214	2037	903	1308	1456	1593	0,10	-0,18	0,02
Cantábrico COMPLETO sin C.I. País Vasco	1304	173	1764	858	1198	1301	1402	0,02	-0,17	0,02
C.I. País Vasco	1374	194	2011	906	1240	1384	1495	0,24	-0,14	0,07
Norte III y C.I. País Vasco	1421	204	2027	904	1272	1436	1551	0,13	-0,17	0,03
C.I. Galicia Costa	1562	305	2448	877	1335	1538	1732	0,52	-0,15	0,05
Norte COMPLETO	1349	207	1965	845	1220	1332	1471	0,47	-0,15	0,05
Tera-Órbigo-Esla- Valderaduey	772	163	1223	461	657	738	882	0,47	-0,06	0,42
Carrión-Pisuerga- Arlanza	613	114	957	385	528	594	693	0,31	-0,07	0,37
Alto Duero-Riaza	586	105	881	327	506	563	658	0,42	-0,09	0,24
Adaja-Cega-Bajo Duero	469	89	655	283	407	457	542	0,07	-0,02	0,79
Tormes-Águeda	596	134	891	341	495	589	705	0,24	-0,05	0,51
Duero COMPLETO	616	118	928	377	542	593	708	0,30	-0,05	0,50
Cabecera	665	144	1108	375	554	636	762	0,54	-0,14	0,06
Henares-Tajuña	570	109	851	297	496	549	642	0,32	-0,13	0,10
Jarama-Guadarrama	577	118	844	309	490	568	662	0,06	-0,13	0,08
Alberche	608	144	1055	336	506	592	710	0,41	-0,17	0,03
Tajo Medio margen izquierda	492	107	743	255	420	475	582	0,13	-0,12	0,12
Bajo Tajo margen derecha	851	219	1405	450	686	846	1028	0,18	-0,13	0,09
Bajo Tajo margen izquierda	606	145	868	344	496	591	714	0,15	-0,08	0,27
Tajo COMPLETO	642	138	970	348	541	637	763	0,22	-0,13	0,10
Cuenca Alta	453	102	663	223	386	443	536	0,07	-0,09	0,23
Jabalón-Bullaque	521	133	839	247	442	499	618	0,14	-0,09	0,24
Centro	559	142	829	295	450	529	670	0,20	-0,01	0,87
Guadiana II	617	182	1269	254	488	602	748	0,50	-0,06	0,41
Guadiana COMPLETO	527	126	771	267	437	492	625	0,16	-0,04	0,62
Cabecera margen derecha	605	174	1061	262	492	579	713	0,45	-0,06	0,40
Guadiana Menor	515	133	882	258	428	501	599	0,41	-0,04	0,57
Guadalquivir Medio margen izquierda	570	157	982	262	468	549	661	0,38	-0,03	0,71
Guadalquivir Medio margen derecha	632	183	1110	269	517	619	766	0,37	-0,01	0,90
Bajo Guadalquivir margen izquierda	574	163	970	252	454	577	674	0,31	-0,03	0,72
Bajo Guadalquivir margen derecha	685	206	1198	302	536	661	833	0,35	-0,03	0,73
Almonte-Marismas	606	180	1011	257	480	567	744	0,25	-0,03	0,66
Alto Genil	569	159	1077	242	467	539	675	0,46	-0,12	0,13
Guadalquivir COMPLETO	589	159	988	289	482	568	694	0,36	-0,04	0,64
Sistema I	762	215	1340	344	626	724	857	0,68	-0,07	0,35
Sistema II	604	184	1053	202	478	583	681	0,56	-0,14	0,06
Sistema III	506	145	942	206	407	483	583	0,60	-0,06	0,46
Sistema IV	326	91	554	162	266	313	396	0,34	-0,17	0,03
Sistema V	329	102	610	168	252	316	399	0,62	-0,08	0,32
C.I. Andalucía, Mediterráneo	546	138	916	263	466	522	619	0,55	-0,11	0,15
Tinto-Piedras-Odiel	648	191	1247	317	521	633	770	0,47	0,04	0,56
Guadalete-Barbate	787	225	1453	379	623	768	924	0,57	-0,04	0,63
C.I. Andalucía, Atlántico	725	201	1262	363	597	692	837	0,46	-0,01	0,86
C.I. Andalucía	613	155	1031	304	517	599	692	0,51	-0,06	0,43
Cabecera	508	119	785	277	428	500	587	0,15	0,06	0,44
Margen izquierda	316	82	565	187	257	309	352	0,76	-0,04	0,62
Margen derecha	356	99	675	189	285	342	423	0,66	0,03	0,69
Litoral	280	83	544	136	208	274	329	0,59	0,05	0,50



CEDEX

Cuenca	Media	Desv.Típ.	Máx	mín	c25	c50	c75	CSesgo	rMK	pvalor
Segura COMPLETO	377	87	607	215	311	366	432	0,40	0,04	0,61
Norte	559	131	924	316	466	536	634	0,55	-0,04	0,61
Alto Turia	535	108	841	333	468	519	607	0,54	-0,16	0,04
Bajo Turia	479	127	755	269	384	480	552	0,39	-0,06	0,41
Alto Júcar	632	156	1028	350	531	605	757	0,34	-0,12	0,11
Júcar Medio	449	97	694	245	387	450	505	0,27	-0,06	0,43
Bajo Júcar	535	146	926	281	425	516	605	0,62	0,05	0,48
Sur	469	122	832	207	380	464	551	0,44	0,04	0,62
Júcar COMPLETO	518	103	817	317	449	505	590	0,32	-0,06	0,43
Cabecera	768	106	1027	518	694	783	833	-0,06	-0,12	0,11
Tirón-Najerilla-Iregua	733	117	1067	523	629	738	808	0,25	-0,03	0,71
Batas-Zadorra-Inglares-Irati-Arga-Ega	971	147	1333	672	872	970	1065	0,27	-0,19	0,01
Margen derecha desde el Leza hasta el Huecha	512	96	775	360	434	512	568	0,65	-0,18	0,02
Aragón-Arbas	741	117	1019	479	650	730	846	0,26	-0,12	0,11
Jalón-Jiloca	444	84	645	287	383	433	494	0,44	-0,07	0,39
Gállego-Cinca	678	122	976	419	584	667	779	0,39	-0,11	0,15
Èsera-Noguera Ribagorzana	761	129	1047	465	666	742	867	0,24	-0,08	0,26
Segre	666	113	918	396	592	656	744	0,11	-0,18	0,02
Huerta-Aguas Vivas-Martin-Guadalupe-Matarraña	462	92	715	316	392	452	516	0,67	-0,10	0,18
Garona	1057	210	1658	669	908	1038	1152	0,74	0,02	0,79
Ebro COMPLETO	652	91	869	456	576	636	722	0,37	-0,15	0,05
C.I. Cataluña	726	131	1068	456	632	723	793	0,51	-0,12	0,12
España, Península Ibérica	677	108	977	434	597	663	749	0,34	-0,11	0,15
Baleares	581	144	1036	321	487	583	640	0,78	-0,16	0,04
Canarias	310	92	616	121	253	289	362	0,62	-0,08	0,29
España COMPLETA	671	106	965	437	596	657	742	0,35	-0,11	0,16

Tabla 18. Estadísticos de las series anuales de escorrentía regional. 1930/31-2010/11

Cuenca	Media	Desv.Típ.	Máx	mín	c25	c50	c75	CSesgo	rMK	pvalor
Miño-Sil	754	258	1415	359	581	730	875	0,74	-0,13	0,08
Cantábrico	753	159	1245	385	662	751	856	0,21	-0,12	0,12
Norte III	878	196	1391	433	748	873	1003	0,08	-0,17	0,03
Cantábrico COMPLETO sin C.I. País Vasco	774	158	1224	397	678	782	873	0,10	-0,14	0,07
C.I. País Vasco	772	172	1304	388	636	775	879	0,19	-0,11	0,13
Norte III y C.I. País Vasco	836	185	1356	430	698	834	967	0,11	-0,15	0,05
C.I. Galicia Costa	962	303	1850	388	738	940	1124	0,60	-0,13	0,09
Norte COMPLETO	813	203	1427	386	670	800	933	0,54	-0,13	0,08
Tera-Órbigo-Esla-Valderaduey	300	125	698	131	207	278	364	0,98	-0,10	0,19
Carrión-Pisuerga-Arlanza	147	73	414	57	98	137	173	1,24	-0,10	0,17
Alto Duero-Riaza	117	65	321	30	71	100	148	1,17	-0,12	0,12
Adaja-Cega-Baio Duero	74	35	193	26	46	67	88	1,04	-0,08	0,27
Tormes-Agueda	144	83	382	32	76	123	191	0,89	-0,07	0,37
Duero COMPLETO	165	76	419	63	106	151	207	1,04	-0,10	0,19
Cabecera	170	89	497	54	101	149	217	1,05	-0,16	0,04
Henares-Tajuña	126	67	377	35	76	119	160	1,20	-0,09	0,25
Jarama-Guadarrama	169	72	401	63	111	164	222	0,57	-0,15	0,04
Alberche	164	91	536	31	101	150	220	1,12	-0,18	0,02
Tajo Medio margen izquierda	67	44	213	14	33	58	98	0,96	-0,08	0,29
Bajo Tajo margen derecha	335	177	831	62	210	305	462	0,46	-0,12	0,11
Bajo Tajo margen izquierda	138	99	360	10	62	119	198	0,72	-0,07	0,38
Tajo COMPLETO	179	93	454	44	105	171	234	0,61	-0,12	0,12
Cuenca Alta	38	27	127	9	17	29	57	1,18	-0,10	0,18
Jabalón-Bullaque	93	71	288	7	33	81	133	0,82	-0,11	0,16



Cuenca	Media	Desv.Típ.	Máx	mín	c25	c50	c75	CSesgo	τ MK	pvalor
Centro	120	91	322	8	43	86	188	0,71	-0,03	0,70
Guadiana II	151	123	652	6	63	109	235	1,23	-0,05	0,49
Guadiana COMPLETO	95	69	258	9	40	75	145	0,70	-0,05	0,48
Cabecera margen derecha	160	111	481	22	76	130	215	0,99	-0,08	0,32
Guadiana Menor	124	70	317	29	69	110	166	1,01	-0,10	0,20
Guadalquivir Medio margen izquierda	116	96	414	12	43	92	160	1,11	-0,08	0,30
Guadalquivir Medio margen derecha	174	130	584	11	76	142	265	0,97	-0,02	0,84
Bajo Guadalquivir margen izquierda	115	101	410	9	34	81	166	1,17	-0,05	0,53
Bajo Guadalquivir margen derecha	214	156	649	16	90	160	323	0,82	-0,04	0,58
Almonte-Marismas	121	99	390	13	44	86	190	0,96	-0,02	0,77
Alto Genil	166	99	499	23	91	147	218	0,93	-0,12	0,12
Guadalquivir COMPLETO	148	101	429	19	67	121	206	0,91	-0,07	0,35
Sistema I	289	168	766	40	156	244	365	1,09	-0,07	0,35
Sistema II	230	134	585	25	126	195	293	0,91	-0,10	0,17
Sistema III	176	98	564	28	100	158	227	1,32	-0,02	0,76
Sistema IV	38	21	128	13	24	32	45	1,91	-0,17	0,03
Sistema V	30	21	102	10	17	23	35	1,92	-0,07	0,36
C.I. Andalucía, Mediterráneo	171	93	471	27	103	148	220	1,15	-0,09	0,22
Tinto-Piedras-Odiel	160	131	636	10	66	117	239	1,20	0,00	0,99
Guadalete-Barbate	247	164	756	31	122	227	328	0,96	-0,08	0,29
C.I. Andalucía, Atlántico	208	143	622	24	94	174	281	0,91	-0,05	0,51
C.I. Andalucía	185	109	517	26	101	158	241	1,01	-0,07	0,35
Cabecera	121	52	255	32	80	112	156	0,62	0,03	0,66
Margen izquierda	17	7	44	8	13	16	20	1,73	-0,09	0,22
Margen derecha	32	20	129	10	18	27	40	1,91	-0,03	0,72
Litoral	19	8	53	10	13	17	22	1,85	0,00	0,95
Segura COMPLETO	51	19	97	17	36	49	62	0,47	0,00	0,95
Norte	99	50	255	33	64	84	123	1,05	-0,03	0,71
Alto Turia	96	46	217	34	63	87	113	1,04	-0,14	0,06
Bajo Turia	63	36	224	17	38	53	76	1,90	-0,11	0,14
Alto Júcar	134	90	425	31	59	110	192	1,13	-0,14	0,07
Júcar Medio	35	15	70	13	23	32	42	0,81	-0,19	0,01
Bajo Júcar	78	50	262	22	45	62	92	1,71	0,13	0,08
Sur	97	53	281	26	58	85	127	0,94	0,06	0,42
Júcar COMPLETO	81	31	169	33	59	73	102	0,56	-0,09	0,23
Cabecera	260	80	486	102	207	250	313	0,43	-0,08	0,31
Tirón-Najerilla-Iregua	283	87	586	135	213	273	347	0,66	-0,04	0,63
Batas-Zadorra-Inglares-Irati-Arga-Ega	444	119	762	197	366	443	518	0,36	-0,19	0,01
Margen derecha desde el Leza hasta el Huecha	88	40	233	36	55	83	104	1,26	-0,13	0,09
Aragón-Arbas	259	73	448	113	211	252	302	0,57	-0,10	0,19
Jalón-Jiloca	41	18	109	18	29	37	49	1,28	-0,13	0,08
Gállego-Cinca	203	65	402	86	152	195	242	0,68	-0,11	0,16
Ésera-Noguera Ribagorzana	259	73	438	126	206	246	313	0,39	-0,09	0,26
Segre	208	58	333	90	164	208	239	0,19	-0,16	0,03
Huerva-Aguas Vivas-Martín-Guadalope-Matarraña	48	22	119	17	30	43	57	1,14	-0,17	0,03
Garona	603	165	1064	304	480	608	680	0,59	0,01	0,89
Ebro COMPLETO	193	48	342	102	157	189	229	0,45	-0,17	0,03
C.I. Cataluña	189	79	423	83	120	181	227	0,88	-0,14	0,06
España, Península Ibérica	222	73	450	109	164	211	265	0,65	-0,12	0,12
Baleares	127	81	456	28	74	107	163	1,86	-0,09	0,23
Canarias	105	49	269	25	71	91	130	1,11	0,01	0,87
España COMPLETA	219	71	442	108	161	209	263	0,64	-0,12	0,12



CEDEX

El problema más importante encontrado en las series de precipitación y escorrentía anteriores lo constituyen sus tendencias, decrecientes y significativas en muchos casos. La aplicación de modelos de distribución de frecuencias o la generación de series sintéticas se apoya en la hipótesis de estacionariedad, que queda en duda después de observar estas tendencias en numerosas regiones y los resultados del test de Mann Kendall (Wilks, 2006) que aparecen en las tablas anteriores. En la Figura 4 se muestran las series y tendencias estimadas de precipitación y escorrentía promediadas en las cuencas españolas de la Península Ibérica.

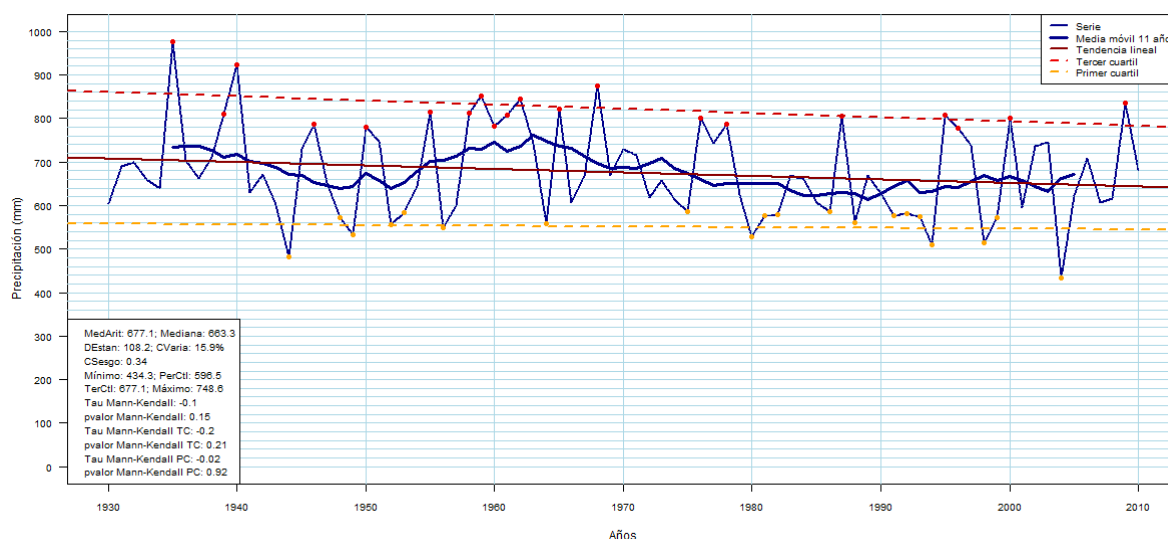


Figura 4. Series y tendencias de precipitación en la Península Ibérica

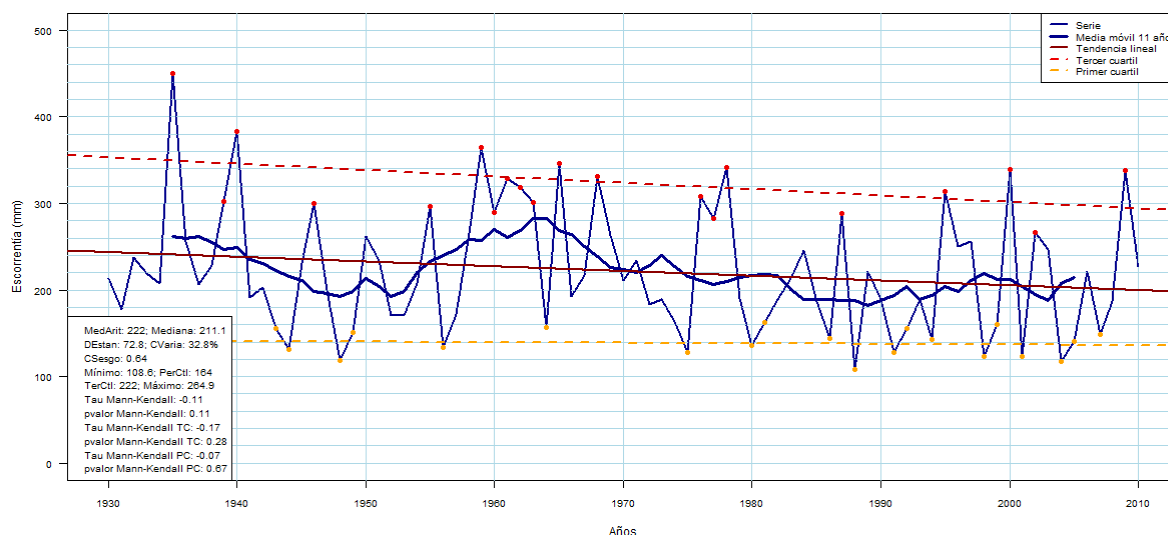


Figura 5. Series y tendencias de escorrentía en la Península Ibérica

3.2 RACHAS Y SEQUÍAS EN ESPAÑA DURANTE EL PERIODO DE PLANIFICACIÓN HIDROLÓGICA

3.2.1 Parametrización del Modelo de Rachas

Tradicionalmente se han venido utilizando las técnicas de caracterización de sequías basadas en la identificación de rachas en series de variables hidrológicas como la lluvia o las aportaciones. En el apartado 2.1 se describieron parámetros como los umbrales de entrada y recuperación, así como variables aleatorias como el déficit o la duración (Menéndez, 1996; Cancellieri et al. 1995).

Este modelo de identificación se ha utilizado en las series de lluvias y escorrentías mensuales comprendidas entre octubre de 1930 y septiembre de 2011 y a las series anuales comprendidas entre los años hidrológicos 1930/31 y 2010/11. Ambos conjuntos de series proceden de la simulación SIMPA-CEH08 y corresponden a las medias regionales de cada zona del SIEH. Se les ha aplicado un modelo de sequías con umbrales de entrada fijados en el cuantil del 85% por afinidad con modelos como el del índice estandarizado de precipitación. Este umbral es variable mensualmente en el caso de las series mensuales. Por otro lado, se fija en un 10% el coeficiente de recuperación de sequía. Mayores valores de este parámetro reducen el número de sequías excesivamente.

3.2.2 Sequías Identificadas

La Figura 6 muestra el cronograma de sequías identificadas aplicando el modelo de rachas a series de lluvia y escorrentía en la Península Ibérica. En cada variable hay un acuerdo relativo en los resultados alcanzados a escala mensual y anual. Con carácter general, la existencia de una sequía estacional deriva en una de carácter anual o, al contrario, la señal captada en la escala anual, también existe en la estacional. Pero esto no siempre se cumple y se tienen sequías estacionales o anuales sin un reflejo en la escala complementaria.

La propagación de la sequía desde la señal de déficit en precipitaciones hasta su reflejo en aportaciones no aparece clara en los cronogramas de rachas ya que se mezclan los efectos que producen la estacionalidad del ciclo hidrológico y la distinta intensidad con la que se manifiestan variables como la ETP o la lluvia, la capacidad de regulación de los acuíferos e, incluso su memoria o acumulación de efectos diferidos de distintas rachas de déficit en su almacenamiento y drenaje.

Finalmente, otro aspecto a destacar es el de la influencia de la tendencia de las series que ya se destacó en el apartado 3.1. La mayoría de las rachas secas se encuentran desde mitad de los años 70 hasta el final de la serie.



CEDEX

Caracterización Hidrológica de Sequías

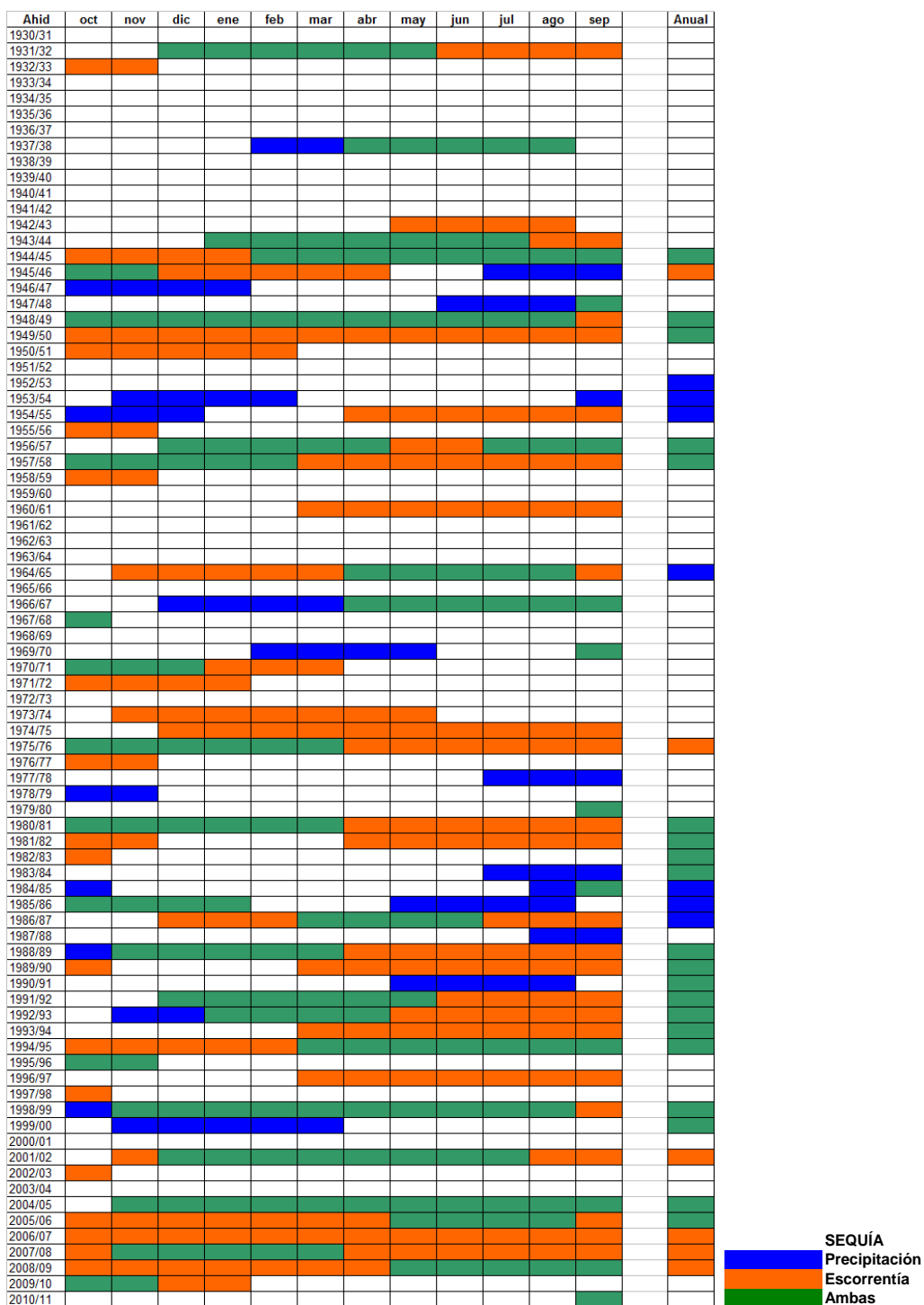


Figura 6. Rachas de sequías de lluvia y escorrentía en la Península Ibérica

Al comparar las sequías identificadas en precipitaciones y en aportaciones se distinguen los siguientes casos:

1. Evento de sequía estacional en lluvias con efecto inmediato en escorrentía y recarga, por lo que los niveles bajos se mantienen durante el verano y principios del otoño
2. Sequía en lluvias con efecto diferido en escorrentías que retrasa la entrada en sequía unos meses
3. Sequía en lluvias sin impacto grave en las escorrentías
4. Reducción de lluvias que sin llegar a niveles excesivamente reducidos, tienen impacto y causan sequías en escorrentías
5. Sequía en lluvias con efecto diferido en escorrentías. Hay una posterior recuperación de las lluvias, pero la sequía en escorrentías se mantiene

Es decir, las características de las sequías varían en función de la variable considerada, del mecanismo de generación de escorrentía, de la torrencialidad de la lluvia y de la estacionalidad ligada a estos dos aspectos últimos. De hecho en Van Loon et al. (2012) se usa una clasificación de sequías siguiendo una línea similar al estudiar los cambios de propiedades de las sequías en la propagación.

A continuación se muestran los cronogramas de sequías identificadas en algunas regiones españolas mediante la aplicación del modelo de rachas de lluvia y escorrentía. La colección completa de cronogramas de todas las regiones SIEH se incluye en el anejo.



CEDEX

La Figura 7 muestra las rachas identificadas en series de la cuenca del Esla, afluente por margen derecha del Duero. Las sequías más importantes se concentran a finales de los años 40 y principios de los 50, en los años 80, 90 y principios del s. XXI. Parece predominar el caso de lluvias con efecto inmediato o escasamente diferido en escorrentías que pueden prolongar la duración de las sequías desde el final de la de lluvias.

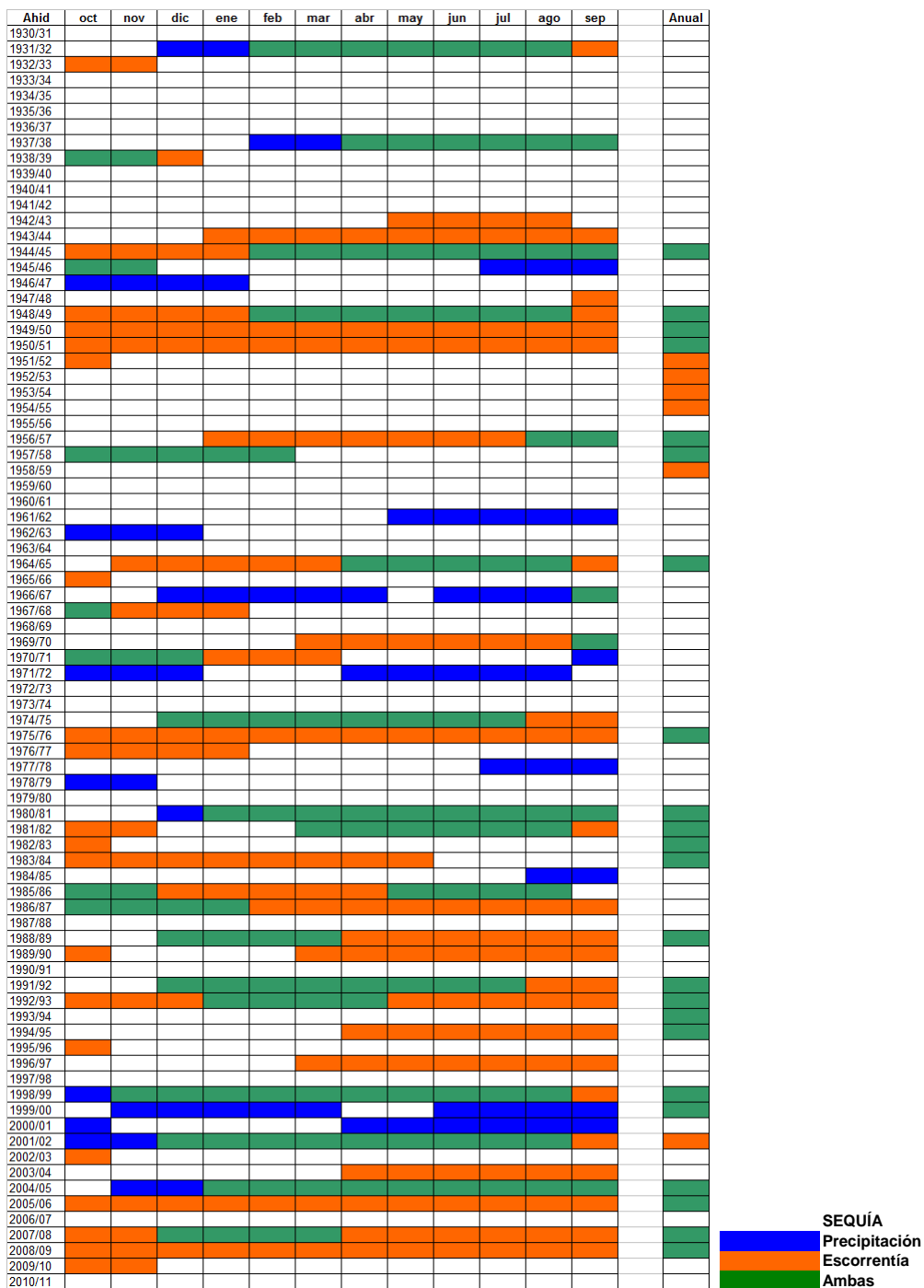


Figura 7. Rachas de sequías de lluvia y escorrentía en la cuenca del Esla en el Duero

La Figura 8 muestra las rachas secas de la cabecera del Tajo. Existen periodos secos en lluvias con impacto suavizado en las escorrentías, aunque en general, tal como se comprueba en las sequías de los años 40, 50, 80, 90 y s. XXI los déficit de lluvia se trasladan a las escorrentías que dilatan el fin de la sequía. Los eventos más importantes parecen concentrarse en los años 80, 90 y segunda mitad del primer decenio del s. XXI.

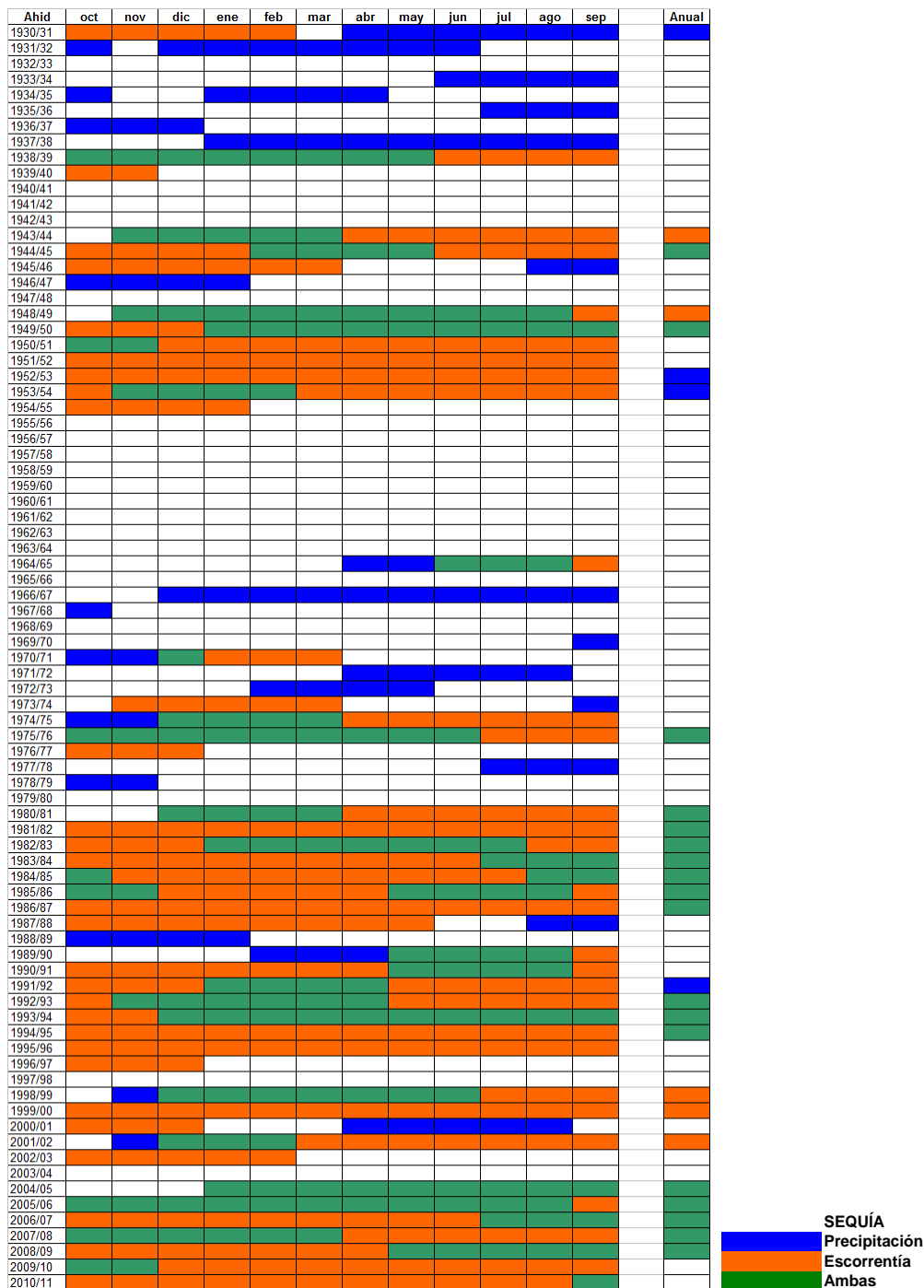


Figura 8. Rachas de sequías de lluvia y escorrentía en la cabecera del Tajo



CEDEX

La Figura 9 muestra las rachas estimadas en series de afluentes por margen derecha del bajo Guadalquivir. La imagen es similar a la anterior, con importantes sequías en la primera mitad de los años 80, 90 y durante los años que siguen al 2004/05. Las sequías en escorrentías muestran retardos respecto a las de lluvias.

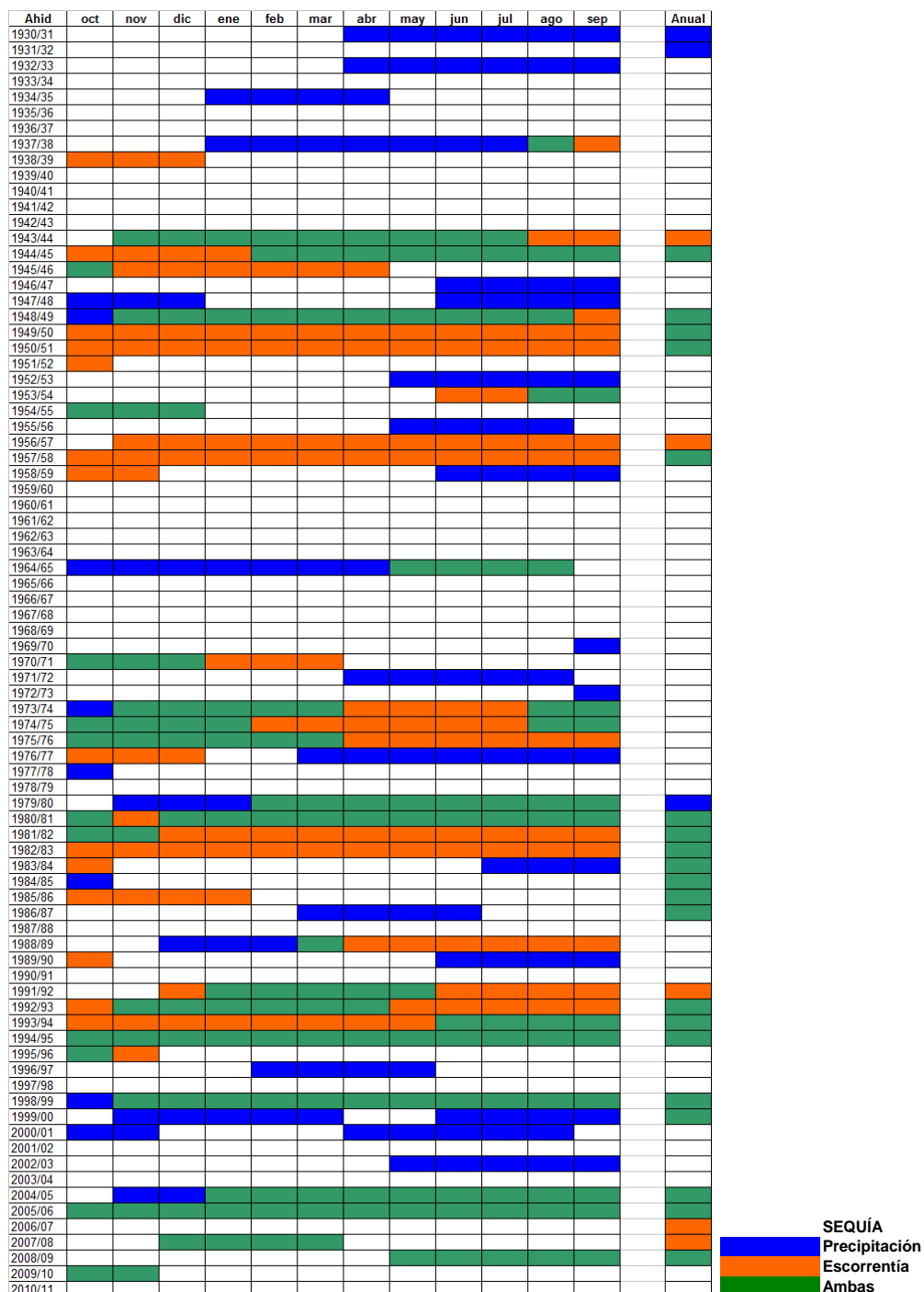


Figura 9. Rachas de sequías de lluvia y escorrentía en cuencas de margen derecha en el bajo Guadalquivir

En la cuenca del Segura (Figura 10) aparecen dos grandes periodos en los que las sequías son más frecuentes. El primero abarcaría desde el inicio del ciclo de estudio hasta los años 50; el segundo desde los años 80, con sequías importantes en los años 80, primera mitad de los 90 y hacia la primera mitad del primer decenio del s. XXI.

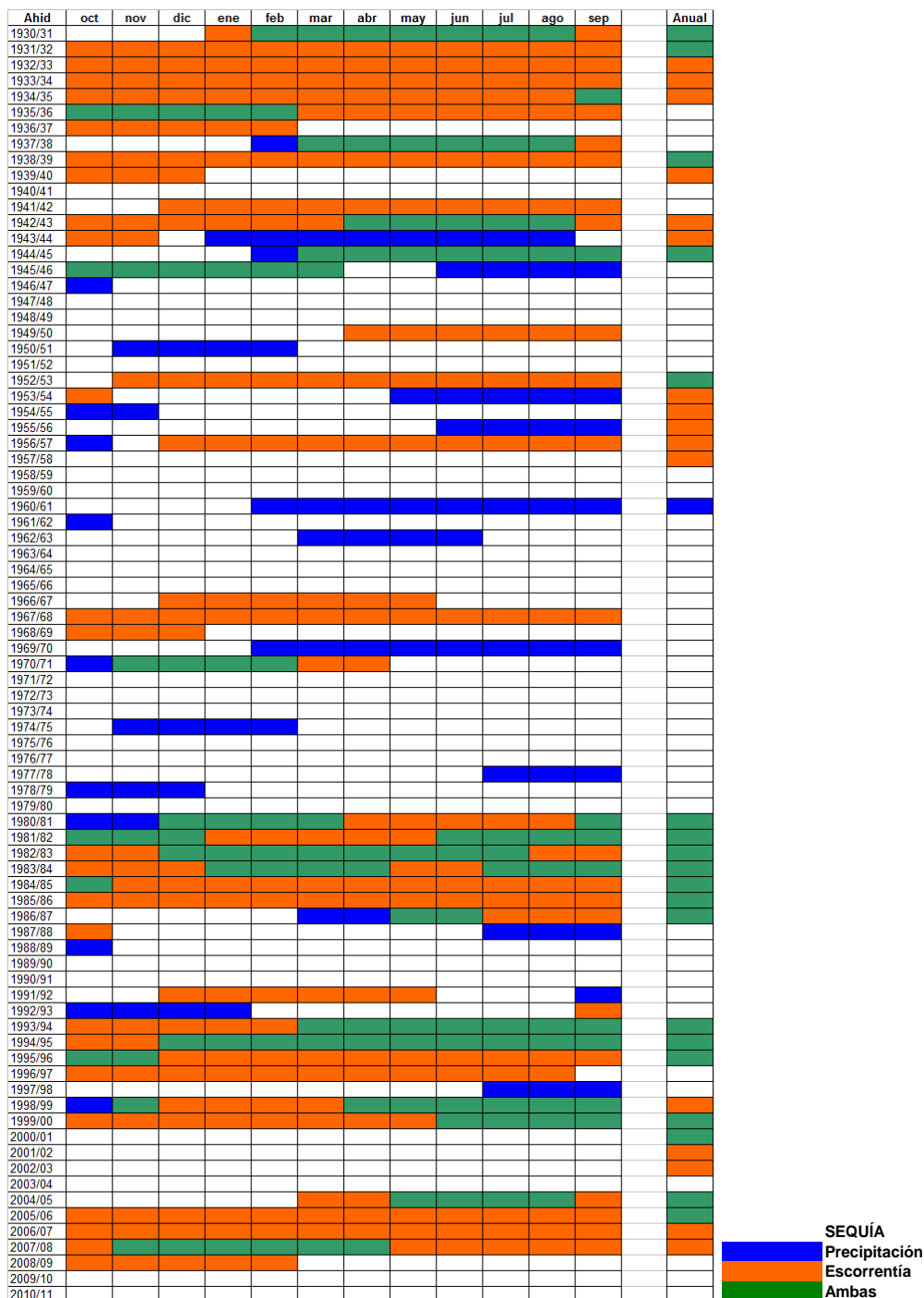


Figura 10. Rachas de sequías de lluvia y escorrentía en la cuenca del Segura



La Figura 11 se refiere a la cabecera del Ebro. Vuelve a mostrar 2 periodos de sequía predominante en los años 40 y finales de los 80. La segunda puede considerarse generada por escasas lluvias de finales de los 80, principios de los 90, 2001/02 y años posteriores al 2004/05 cuyo efecto queda enlazado al considerar las escorrentías.

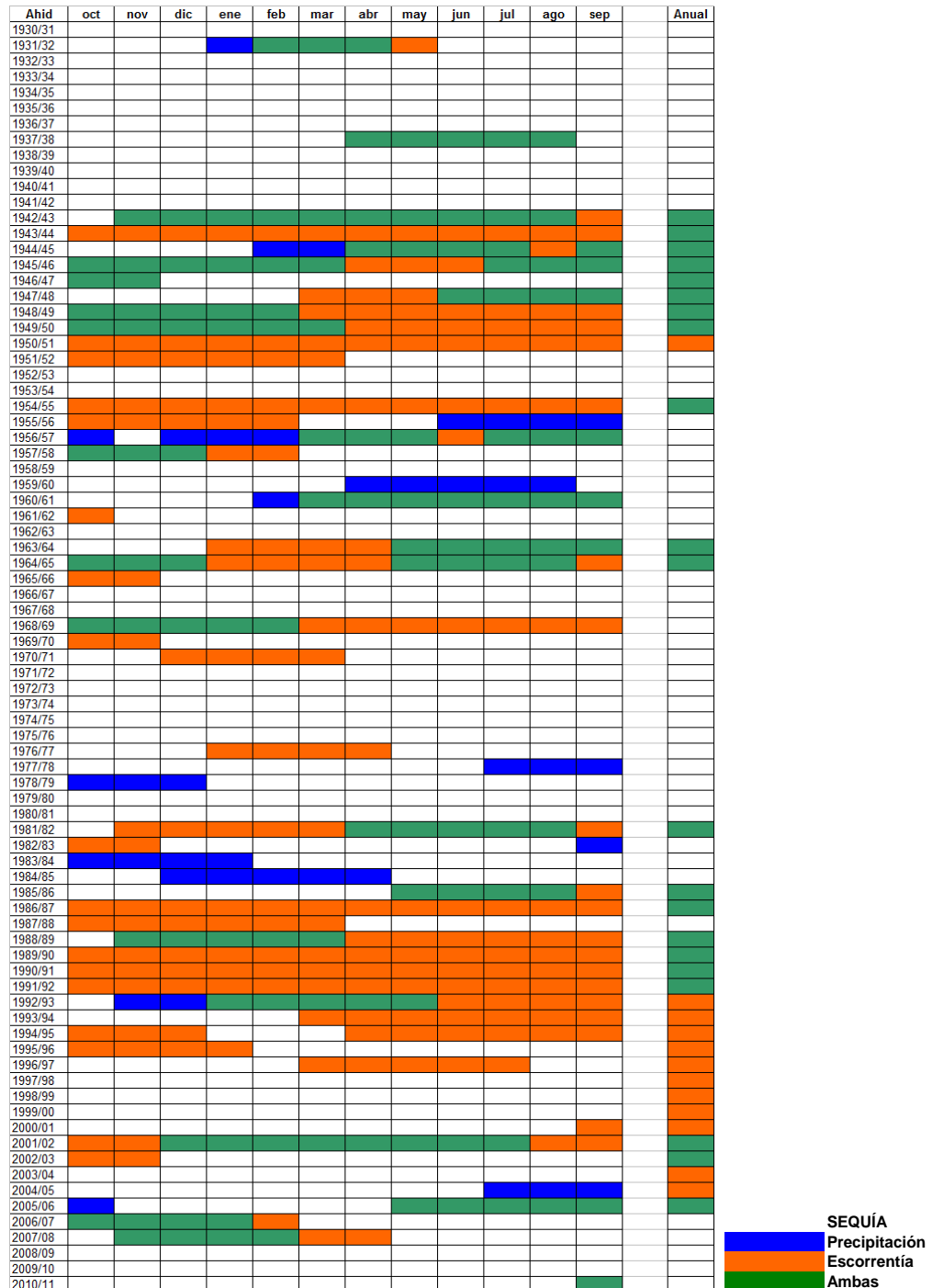


Figura 11. Rachas de sequías de lluvia y escorrentía en la cabecera del Ebro

En las Cuencas Internas de Cataluña las sequías son especialmente importantes. Hay 2 periodos destacados: uno de finales de los años 40 y otro desde la segunda mitad de los años 90 hasta el s. XXI. A diferencia de las cuencas atlánticas es en la segunda mitad de los años 90 cuando se detecta sequía que, además parece que continúa hasta alcanzar las altas intensidades de la segunda mitad del primer decenio del s.XXI.

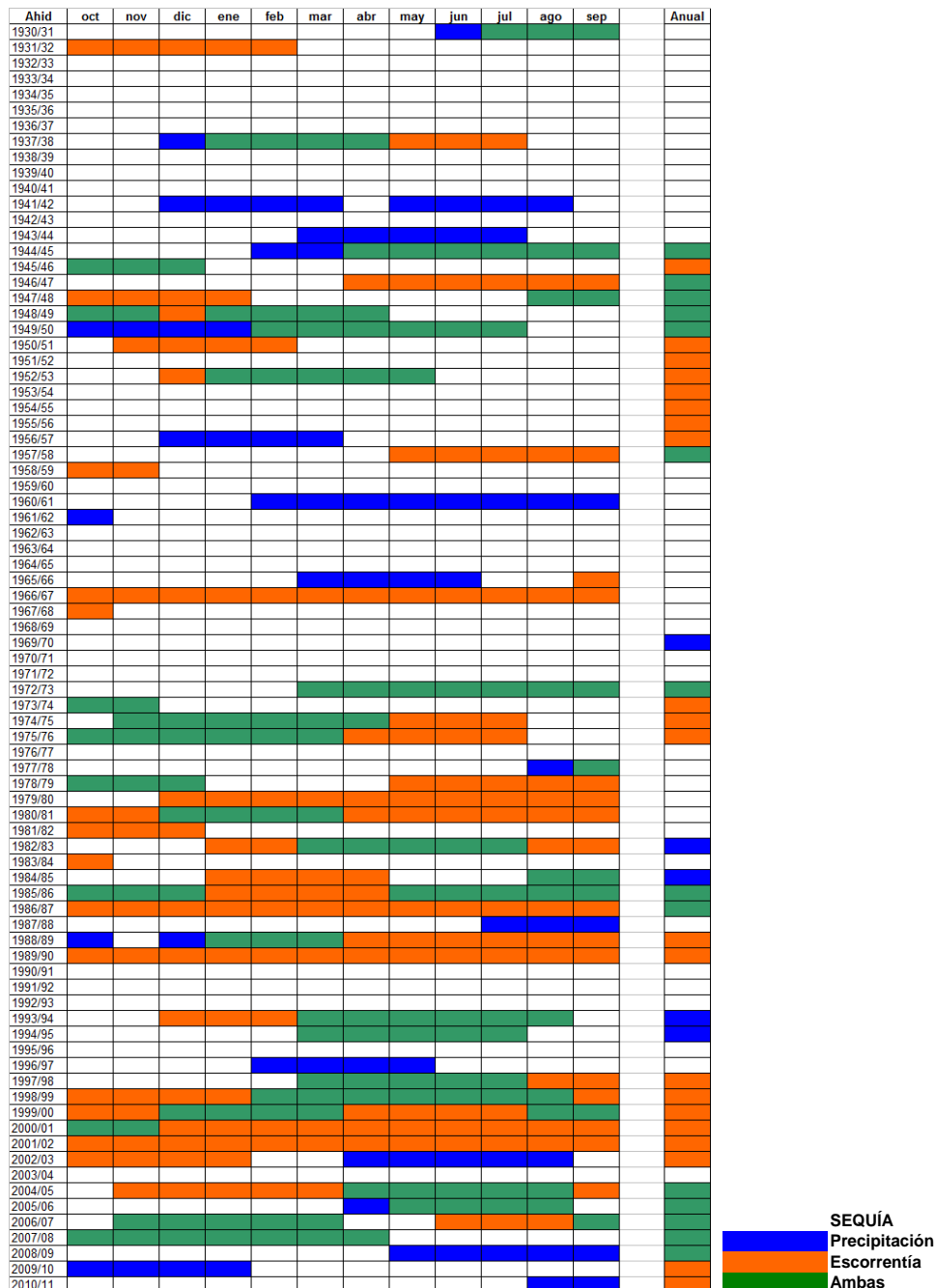


Figura 12. Rachas de sequías de lluvia y escorrenτία en Cuencas Internas de Cataluña



3.2.3 Conclusiones Parciales

Las relaciones entre lluvia y escorrentía que se han tratado corresponden a un régimen natural, sin alteraciones por extracciones, regulación o derivaciones del recurso. La aplicación del modelo de rachas a series mensuales de lluvia y escorrentía amplía los factores a tener en cuenta en el desarrollo y generación de una sequía. Una reducción de lluvias intensa o duradera provoca la de escorrentías cuando la cadena de almacenamientos que representan el ciclo hidrológico con efecto de laminación que lo representan y, principalmente, la capacidad de regulación de los acuíferos, no compensa suficientemente el déficit coyuntural. Inicialmente se espera que debido a esta capacidad de regulación natural de los acuíferos, se tenga un menor número de sequías en series de escorrentía y con un déficit relativo menor que el de lluvias.

Sin embargo, la comparación entre las sequías identificadas con un modelo de rachas a ambas series sugiere considerar no solo la influencia de la capacidad de regulación de los acuíferos, sino también la de la tendencia climática general y al estado inicial de los acuíferos en el momento en que se produce el déficit de lluvia, de la secuencia estacional de intensidades de lluvia y ETP, de la torrencialidad de las lluvias y del reparto entre escorrentía superficial y subterránea. Por otro lado, la inercia de la respuesta de los acuíferos puede mantener niveles bajos de las aportaciones durante un periodo diferido al de las lluvias reducidas.

Dado lo anterior, se ampliarían los factores relacionados con la propagación de sequías a lo largo del ciclo hidrológico y que son necesarios al considerar la ocurrencia de sequías hidrológicas, es decir, en cuanto a los recursos hídricos. Esto acentuaría la necesidad de mantener modelos de simulación hidrológica que permitan considerar estos factores y su combinación.

Se ha descrito un conjunto de resultados sin haber destacado especialmente los valores de duración o la intensidad del déficit alcanzado en cada una de las sequías. Ambas son variables aleatorias de las que se obtiene una muestra escasa con series de más de 80 años, lo que impide la caracterización directa de las frecuencias de ocurrencia. Especialmente si se considera que hay al menos 2 variables en juego, duración y déficit.

3.3 **ÍNDICE DE PRECIPITACIÓN ESTANDARIZADA (IPE)**

3.3.1 Fundamentos Prácticos

El índice IPE se aplica a la identificación y caracterización de sequías hidrológicas (Sivakumar et. al., 2011). Su uso se fundamenta en dos aspectos principales. Por un lado, la distribución teórica ajustada a la serie de lluvias; por otro, la selección de este orden de agregación de las lluvias para representar cada variable hidrológica. Teóricamente, se considera que un orden de agregación mensual representaría la dinámica de la lluvia y de la escorrentía directa; uno estacional, es decir, de unos 3 meses, sería predictivo de la dinámica del agua en el suelo, mientras que otro semestral o superior lo sería de una componente subterránea y, en función del peso de esta componente, de la aportación total. De acuerdo a lo anterior, es entonces necesario comprobar para cada variable hidrológica cuál es el paso de agregación de lluvias que le corresponde.

La Tabla 19 y la Figura 13 se han elaborado con datos de lluvia y escorrentía media mensual en España. El paso de agregación de la serie de lluvias es 12, 24, 36 y 48 meses. Es decir, son series sin estacionalidad ya que agregan lluvias en pasos múltiplos de 12 meses. Se comprueba que la relación entre cada pareja de variables, precipitación agregada y escorrentía, no es lineal y el uso de pasos mayores no linealiza la relación sino que, en estos pasos, se pierde la linealidad. El coeficiente R^2 , relación entre varianza explicada respecto a la total de la Tabla 19, es un índice que podría utilizarse como reflejo de la baja linealidad alcanzada y de su pérdida conforme aumenta el paso de agregación.

Tabla 19. Coeficiente R^2 de la relación entre lluvia agregada y escorrentía en regiones SIEH

Región SIEH	12 meses	24 meses	36 meses	48 meses
Miño-Sil	0,11	0,06	0,03	0,03
Cantábrico	0,08	0,06	0,04	0,03
Norte III	0,08	0,06	0,04	0,02
Cantábrico COMPLETO sin C.I. País Vasco	0,08	0,06	0,04	0,03
C.I. País Vasco	0,09	0,06	0,04	0,02
Norte III y País Vasco	0,08	0,06	0,04	0,02
C.I. Galicia Costa	0,08	0,05	0,03	0,02
Norte COMPLETO	0,08	0,05	0,03	0,02
Tera-Órbigo-Esla-Valderaduey	0,17	0,08	0,05	0,04
Carrión-Pisuerga-Arlanza	0,25	0,13	0,09	0,07
Alto Duero-Riaza	0,28	0,15	0,08	0,07
Adaja-Cega-Bajo Duero	0,28	0,15	0,09	0,06
Tormes-Águeda	0,21	0,10	0,07	0,04
Duero COMPLETO	0,22	0,11	0,07	0,06
Cabecera	0,37	0,22	0,13	0,11
Henares-Tajuña	0,30	0,15	0,09	0,09
Jarama-Guadarrama	0,13	0,06	0,04	0,04
Alberche	0,12	0,05	0,05	0,05
Tajo Medio margen izquierda	0,13	0,06	0,03	0,03
Bajo Tajo margen derecha	0,11	0,05	0,04	0,03
Bajo Tajo margen izquierda	0,11	0,05	0,03	0,03
Tajo COMPLETO	0,14	0,07	0,05	0,04
Cuenca Alta	0,27	0,16	0,08	0,06
Jabalón-Bullaque	0,14	0,07	0,04	0,03
Centro	0,12	0,06	0,04	0,03
Guadiana II	0,12	0,05	0,03	0,03
Guadiana COMPLETO	0,13	0,06	0,04	0,03
Cabecera margen derecha	0,17	0,08	0,05	0,04
Guadiana Menor	0,22	0,10	0,05	0,04
Guadalquivir Medio margen izquierda	0,21	0,12	0,07	0,05
Guadalquivir Medio margen derecha	0,13	0,07	0,04	0,03
Bajo Guadalquivir margen izquierda	0,21	0,13	0,08	0,06
Bajo Guadalquivir margen derecha	0,13	0,07	0,04	0,03
Almonte-Marismas	0,21	0,12	0,07	0,05
Alto Genil	0,30	0,16	0,09	0,07
Guadalquivir COMPLETO	0,18	0,10	0,05	0,04
Sistema I	0,12	0,06	0,03	0,02
Sistema II	0,16	0,09	0,05	0,03
Sistema III	0,14	0,06	0,03	0,02
Sistema IV	0,14	0,05	0,04	0,03
Sistema V	0,16	0,09	0,07	0,04
C.I. Andalucía, Mediterráneo	0,12	0,06	0,03	0,02
Tinto-Piedras-Odiel	0,12	0,06	0,04	0,03
Guadalete-Barbate	0,13	0,07	0,04	0,03
C.I. Andalucía, Atlántico	0,13	0,07	0,04	0,03
C.I. Andalucía	0,12	0,06	0,03	0,02
Cabecera	0,27	0,15	0,08	0,05
Margen izquierda	0,20	0,13	0,09	0,06
Margen derecha	0,22	0,13	0,11	0,07



CEDEX

Caracterización Hidrológica de Sequías

Región SIEH	12 meses	24 meses	36 meses	48 meses
Litoral	0,14	0,09	0,07	0,05
Segura COMPLETO	0,22	0,12	0,08	0,05
Norte	0,39	0,20	0,14	0,11
Alto Turia	0,40	0,20	0,10	0,08
Bajo Turia	0,32	0,19	0,11	0,07
Alto Júcar	0,39	0,24	0,14	0,13
Júcar Medio	0,44	0,33	0,21	0,17
Bajo Júcar	0,29	0,20	0,13	0,09
Sur	0,23	0,15	0,11	0,07
Júcar COMPLETO	0,34	0,21	0,14	0,11
Cabecera	0,17	0,09	0,07	0,05
Tirón-Najerilla-Iregua	0,12	0,06	0,04	0,03
Batas-Zadorra-Inglares-Irati-Arga-Ega	0,13	0,09	0,07	0,06
Margen derecha desde el Leza hasta el Huecha	0,17	0,08	0,05	0,04
Aragón-Arbas	0,15	0,09	0,06	0,06
Jalón-Jiloca	0,28	0,18	0,09	0,05
Gállego-Cinca	0,20	0,11	0,08	0,07
Ésera-Noguera Ribagorzana	0,18	0,09	0,07	0,07
Segre	0,20	0,10	0,08	0,08
Huerva-Aguas Vivas-Martín-Guadalupe-Matarraña	0,23	0,10	0,06	0,05
Garona	0,18	0,12	0,10	0,09
Ebro COMPLETO	0,19	0,11	0,08	0,08
C.I. Cataluña	0,19	0,09	0,07	0,06
España, Península Ibérica	0,14	0,07	0,04	0,04
Baleares	0,16	0,11	0,08	0,06
Canarias	0,19	0,10	0,09	0,07
España COMPLETA	0,14	0,07	0,04	0,04

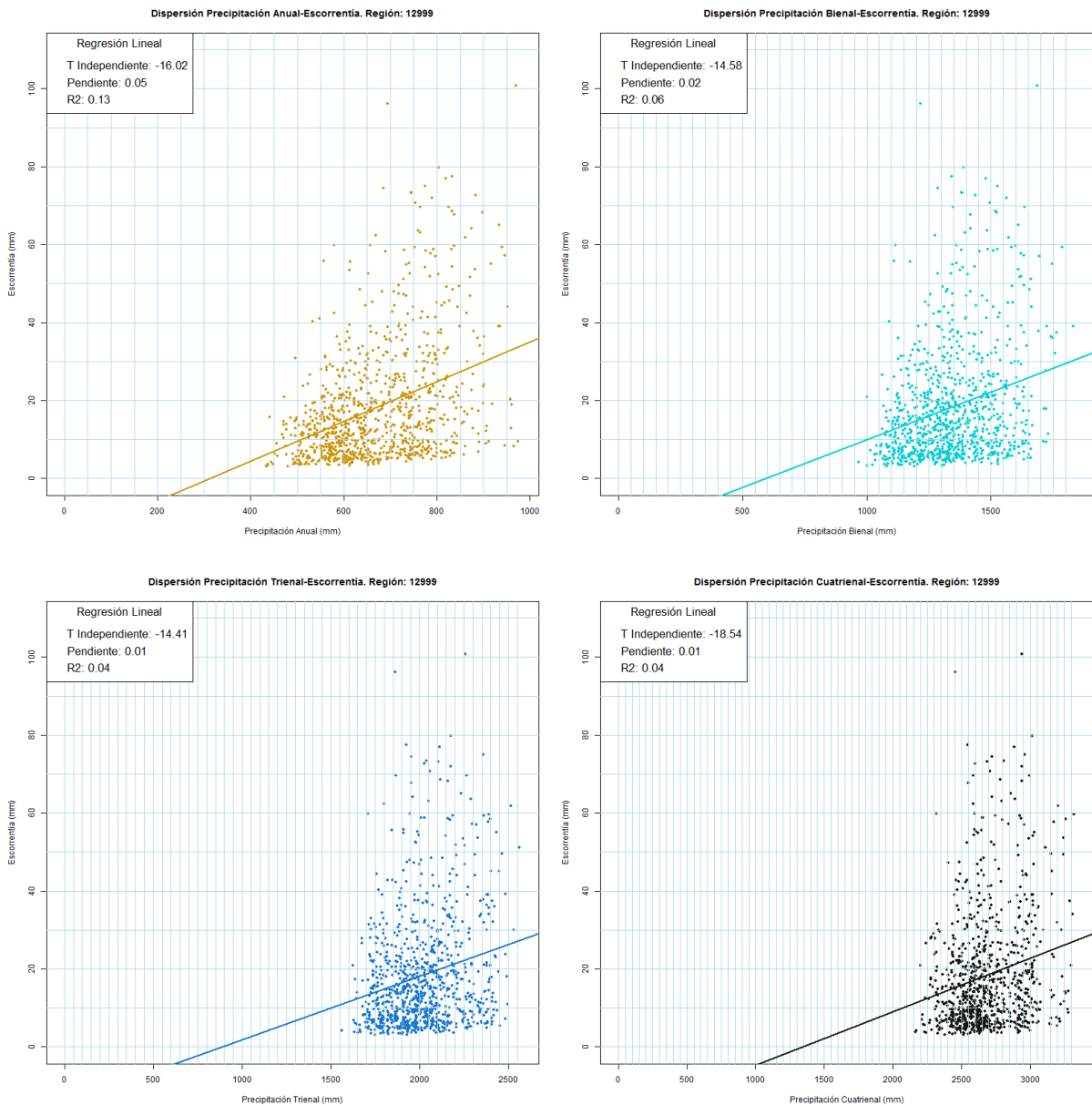


Figura 13. Dispersiones de lluvia agregada anual, bienal, trienal y cuatrienalmente frente a escorrentía. Si el paso de agregación es inferior al año, es decir, de 1, 3 ó 6 meses, las relaciones deben considerar la estacionalidad de las variables. Diferenciando convenientemente los resultados de cada mes, se encuentra un incremento sustancial de los coeficientes R^2 .

La Tabla 20 muestra el paso de agregación óptimo de las lluvias mensuales en relación a la escorrentía mensual, es decir, con el valor máximo del R^2 calculado. Se comprueba que para representar la escorrentía, en cuencas y estaciones climáticas húmedas predominan los pasos de agregación de lluvia de 1 mes, mientras que en cuencas y época seca son predominantes los pasos de 3 y 6 meses. Es decir, hay dos patrones de variación, el regional y el estacional.



CEDEX

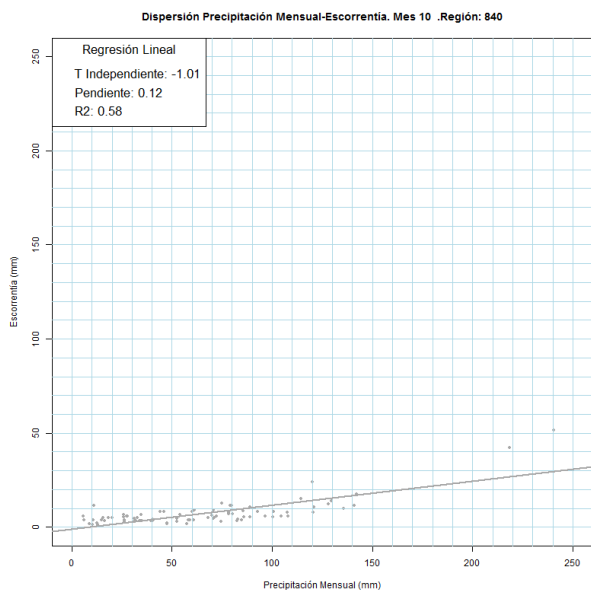
Tabla 20. Paso de agregación intranual optimizado en función del coeficiente R^2

	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP
Miño-Sil	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	6	1
Cantábrico	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	1	1
Norte III	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	1	1
Cantábrico COMPLETO sin C.I. País Vasco	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	1	1
C.I. País Vasco	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	1	1
Norte III y País Vasco	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	1	1
C.I. Galicia Costa	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	3	1
Norte COMPLETO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	3	1
Tera-Órbigo-Esla-Valderaduey	1	1	1	1	1	1	1	1	6	6	6	1
Carrión-Pisuerga-Arlanza	1	1	1	1	1	1	6	3	6	6	6	1
Alto Duero-Riaza	1	1	1	3	3	3	6	3	6	6	6	1
Adaja-Cega-Bajo Duero	1	1	1	1	3	1	6	6	6	6	6	1
Tormes-Águeda	1	1	1	1	1	1	6	3	6	6	6	1
Duero COMPLETO	1	1	1	1	1	1	3	3	6	6	6	1
Cabecera	1	1	1	1	3	3	6	3	6	6	6	6
Henares-Tajuña	1	1	1	1	6	3	6	6	6	6	6	1
Jarama-Guadarrama	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Alberche	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Tajo Medio margen izquierda	1	1	1	1	1	1	1	1	1	6	6	1
Bajo Tajo margen derecha	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Bajo Tajo margen izquierda	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Tajo COMPLETO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	6	6	1
Cuenca Alta	1	3	1	1	3	3	6	3	6	6	6	6
Jabalón-Bullaque	1	1	1	1	1	1	1	1	1	6	6	1
Centro	1	1	1	1	1	1	1	1	1	6	6	1
Guadiana II	1	1	1	1	1	1	1	1	1	6	6	1
Guadiana COMPLETO	1	1	1	1	1	1	1	1	6	6	6	1
Cabecera margen derecha	1	1	1	1	1	1	1	1	6	6	6	1
Guadiana Menor	1	1	1	1	1	3	3	3	6	6	6	1
Guadalquivir Medio margen izquierda	1	1	1	1	1	3	3	3	6	6	6	1
Guadalquivir Medio margen derecha	1	1	1	1	1	1	1	1	1	6	6	1
Bajo Guadalquivir margen izquierda	1	1	1	1	3	3	6	6	6	6	6	6
Bajo Guadalquivir margen derecha	1	1	1	1	1	1	1	1	6	6	6	1
Almonte-Marismas	1	1	1	1	3	3	6	6	6	6	6	1
Alto Genil	1	1	1	1	1	3	6	6	6	6	6	6
Guadalquivir COMPLETO	1	1	1	1	1	1	3	3	6	6	6	1
Sistema I	1	1	1	1	1	1	1	1	6	6	1	1
Sistema II	1	1	1	1	1	1	1	6	6	6	6	1
Sistema III	1	1	1	1	1	1	1	1	6	6	1	1
Sistema IV	1	1	1	1	3	1	1	1	1	6	1	1
Sistema V	1	1	1	1	1	6	1	1	6	6	1	1
C.I. Andalucía. Mediterráneo	1	1	1	1	1	1	1	1	6	6	6	1
Tinto-Piedras-Odiel	1	1	1	1	1	1	1	1	6	6	6	1
Guadalete-Barbate	1	1	1	1	1	1	1	1	6	6	6	1
C.I. Andalucía. Atlántico	1	1	1	1	1	1	1	1	6	6	6	1
C.I. Andalucía	1	1	1	1	1	1	1	1	6	6	6	1
Cabecera	1	1	1	1	3	3	6	6	6	6	6	6
Margen izquierda	1	1	1	1	1	1	1	1	1	6	6	1
Margen derecha	1	1	1	1	3	1	1	1	6	6	6	1
Litoral	1	1	1	1	1	1	1	3	6	6	6	1
Segura COMPLETO	1	3	1	1	3	1	1	1	6	6	6	1
Norte	1	3	3	6	6	6	6	3	3	6	6	1
Alto Turia	1	3	1	1	3	6	6	6	6	6	6	6
Bajo Turia	1	3	6	6	6	6	6	6	6	6	6	1
Alto Júcar	1	3	1	1	6	6	6	6	6	6	6	6
Júcar Medio	6	3	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
Bajo Júcar	1	1	1	6	1	6	6	6	6	6	6	1
Sur	1	3	1	1	1	6	3	3	6	6	6	1
Júcar COMPLETO	1	3	1	6	3	6	6	3	6	6	6	1
Cabecera	1	1	1	1	1	1	1	1	3	6	6	1
Tirón-Najerilla-Iregua	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Batas-Zadorra-Inglares-Irati-Arga-Ega	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	3	1
Margen derecha desde el Leza hasta el Huecha	1	1	1	1	3	1	1	1	3	3	3	1
Aragón-Arbas	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Jalón-Jiloca	1	1	1	1	3	6	1	3	3	6	6	1

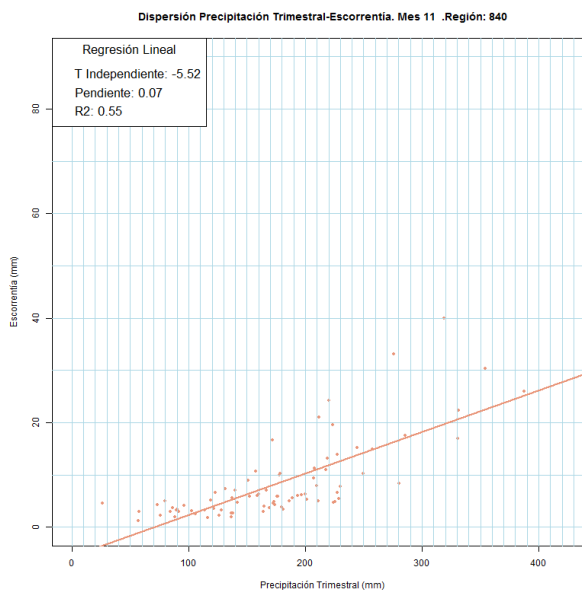
	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP
Gállego-Cinca	1	1	1	1	1	1	1	6	6	6	1	1
Ésera-Noguera Ribagorzana	1	1	1	1	6	1	3	6	6	1	1	1
Segre	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Huerva-Aguas Vivas-Martín-Guadalupe-Matarraña	1	1	1	3	6	1	1	1	3	6	6	1
Garona	1	1	1	1	6	6	3	1	1	1	1	1
Ebro COMPLETO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	1	1
C.I. Cataluña	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
España. Península Ibérica	1	1	1	1	1	1	1	1	6	6	6	1
Baleares	1	1	1	1	1	1	1	1	3	3	1	1
Canarias	1	1	1	1	1	3	6	6	6	6	6	6
España COMPLETA	1	1	1	1	1	1	1	1	6	6	6	1

La explicación de estos patrones regionales y estacionales se puede encontrar en el peso relativo de la componente subterránea respecto a la total. En función de las características hidrodinámicas de las masas de agua subterránea, la descarga de los acuíferos se dilata más o menos en el tiempo, pero esta componente debe tener suficiente peso en la escorrentía total. Por esto, los mayores pasos de agregación se distinguen en las épocas secas y los menores, en las húmedas. Finalmente, tanto la estacionalidad y el predominio de épocas húmedas y secas, simplificadaamente 2 húmedas y 2 secas en la fachada mediterránea y 1 corta estación seca en la atlántica, como los acuíferos y sus características son variables regionalmente.

La Figura 14 muestra los 12 diagramas de dispersión entre lluvias agregadas y escorrentía. La Figura 14 se ha elaborado con los datos de la región SIEH Alto Júcar. Dado el conjunto de resultados, en esta región se tiene la singularidad de que durante 8 meses el paso óptimo de agregación, máximo R^2 , es de 6 meses.



Octubre



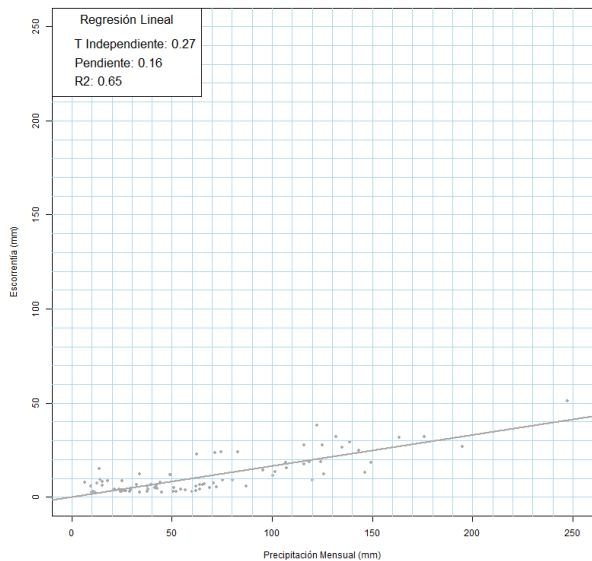
Noviembre



CEDEX

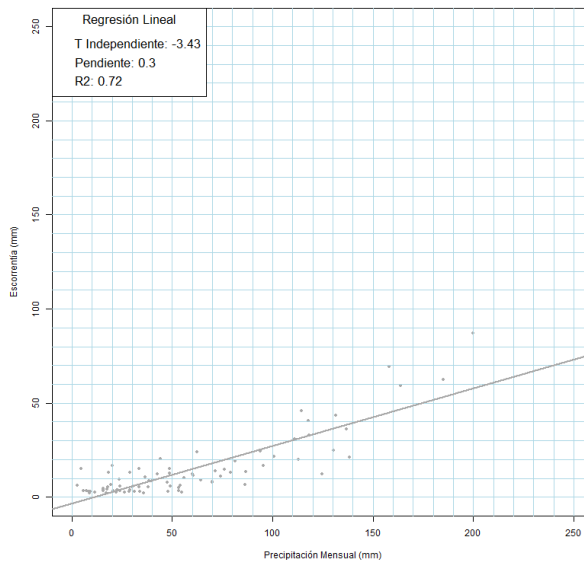
Caracterización Hidrológica de Sequías

Dispersión Precipitación Mensual-Escorrentía. Mes 12 .Región: 840



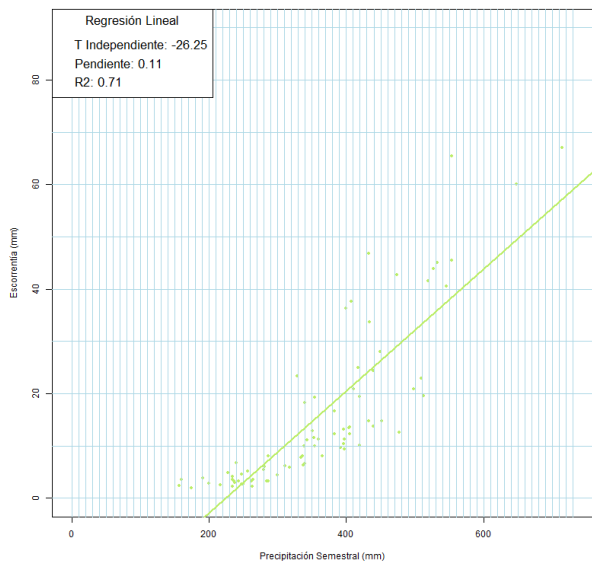
Diciembre

Dispersión Precipitación Mensual-Escorrentía. Mes 1 .Región: 840



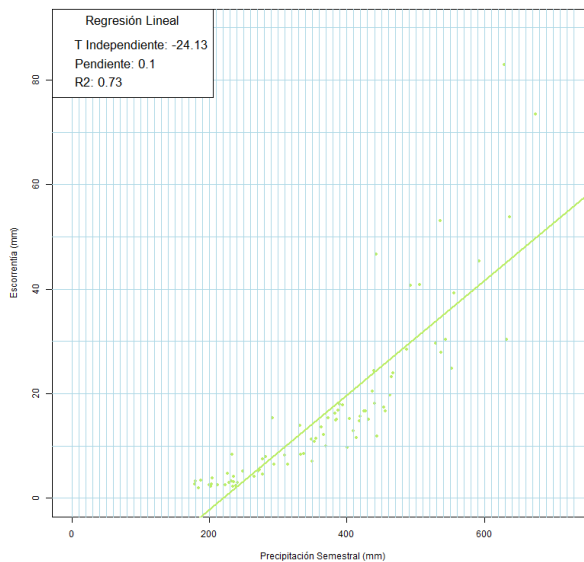
Enero

Dispersión Precipitación Semestral-Escorrentía. Mes 2 .Región: 840

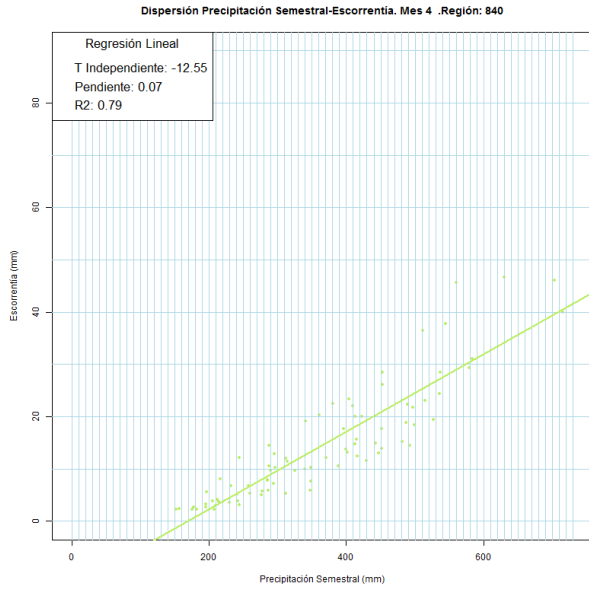


Febrero

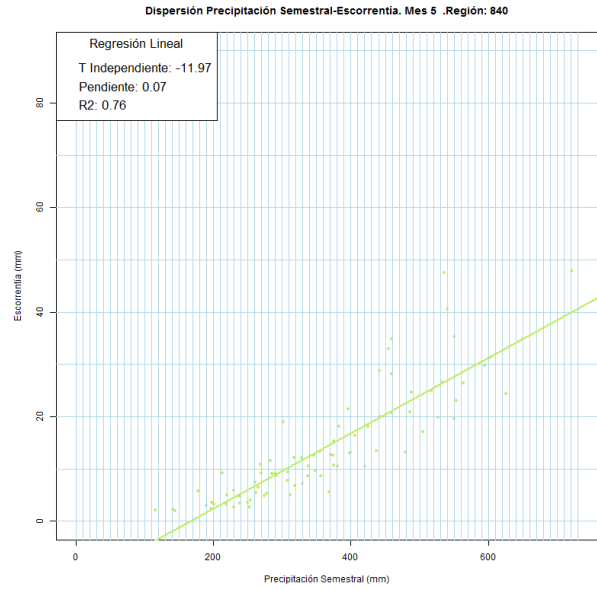
Dispersión Precipitación Semestral-Escorrentía. Mes 3 .Región: 840



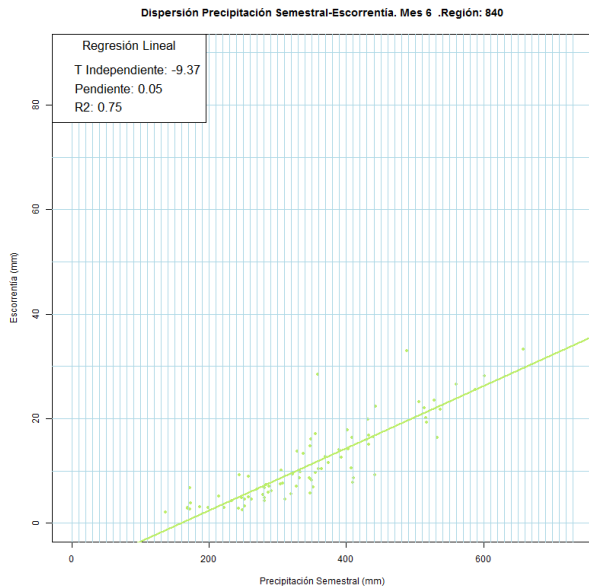
Marzo



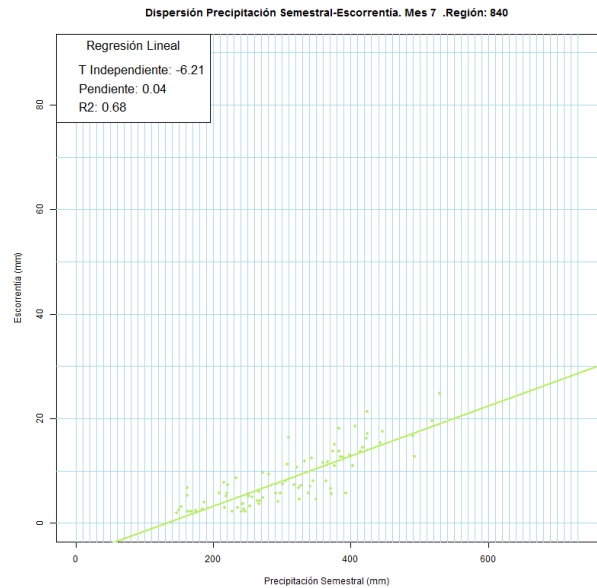
Abril



Mayo



Junio



Julio



CEDEX

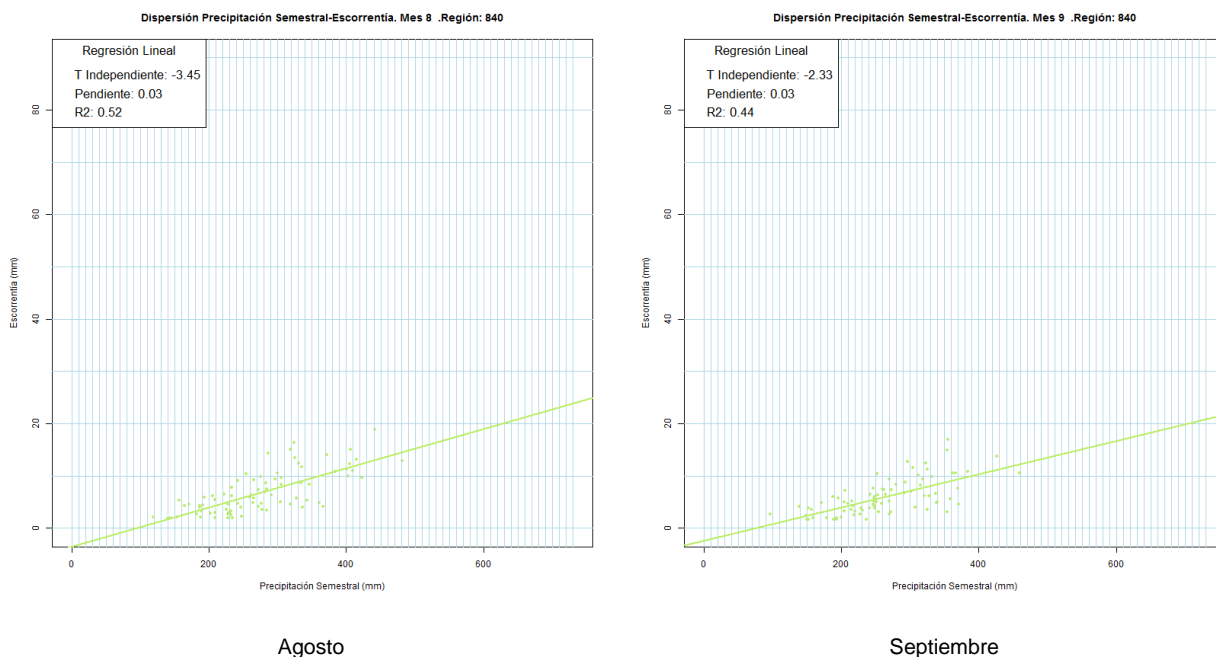


Figura 14. Dispersiones de lluvia agregada mensual, trimestral y semestralmente frente a escorrentía mensual en el Alto Júcar

Estos gráficos mensuales y a pesar de la mejora respecto a las regresiones con lluvias plurianuales, evidencian que el comportamiento en la parte baja del diagrama de dispersión de cualquier mes es diferente al de la parte alta. Los valores bajos suelen quedar por encima de la recta de regresión sobreimpresa; y los altos por debajo, dando una tendencia con curvatura entre ambas zonas. Es decir, la solución lineal no parece completamente satisfactoria como cabría esperar, aunque en la práctica sea suficientemente aproximada.

3.3.2 Propuesta de Índice Combinado de Varios Pasos

El estudio de las sequías en variables del ciclo hidrológico con el índice IPE presenta, por tanto, un inconveniente importante. Mientras que su uso es directo en el caso del estudio de sequías de precipitación, es decir, con paso de agregación de 1 mes, su implementación en otras variables hidrológicas necesita de la incorporación de parámetros regionales y estacionales que respeten los resultados alcanzados en la Tabla 20.

De acuerdo a esto y considerando como problema la identificación de sequías en las variables de precipitación y escorrentía, se propone la generación de 2 conjuntos de mapas IPE. El primero representaría la frecuencia de lluvias y permitiría el estudio de las sequías meteorológicas. El segundo adecuaría las conclusiones de la Tabla 20 para generar mapas mensuales de IPE representativos de la escorrentía que, lógicamente responde a pasos de agregación de 1, 3 y 6 meses, diferentes en función de la región y de la época del año.

Los datos para este cálculo proceden de la simulación de recursos hídricos de España SIMPA-CEH08. Una vez calculados los mapas de precipitación mensual entre los años hidrológicos 1930/31 hasta 2010/11, se implementa el índice estandarizado de

precipitación a cada una de las celdas en las que se subdivide el dominio de trabajo de España. Originalmente son de una resolución de 500 m, lo que supondría procesar más de $2 \cdot 10^6$ series con un tiempo de proceso muy alto. Por razones prácticas se ha tomado una resolución de 10.000 m, que reduce el número de celdas y series a procesar en España a algo más de 5.000.

Habiendo seleccionado la resolución de trabajo, se han leído de los mapas mensuales de lluvia 5.000 series mensuales de lluvia. Cada serie tiene 972 valores entre octubre de 1930 y septiembre de 2011. De cada serie se estiman los valores del IPE de 1, 3, 6 y 12 meses de paso de agregación con los que se vuelven a componer mapas del índice IPE desde cada fecha de inicio, octubre de 1930, enero de 1931, abril de 1931 y septiembre de 1931 respectivamente hasta septiembre de 2011. La Figura 15 muestra los resultados obtenidos para febrero de 1970.

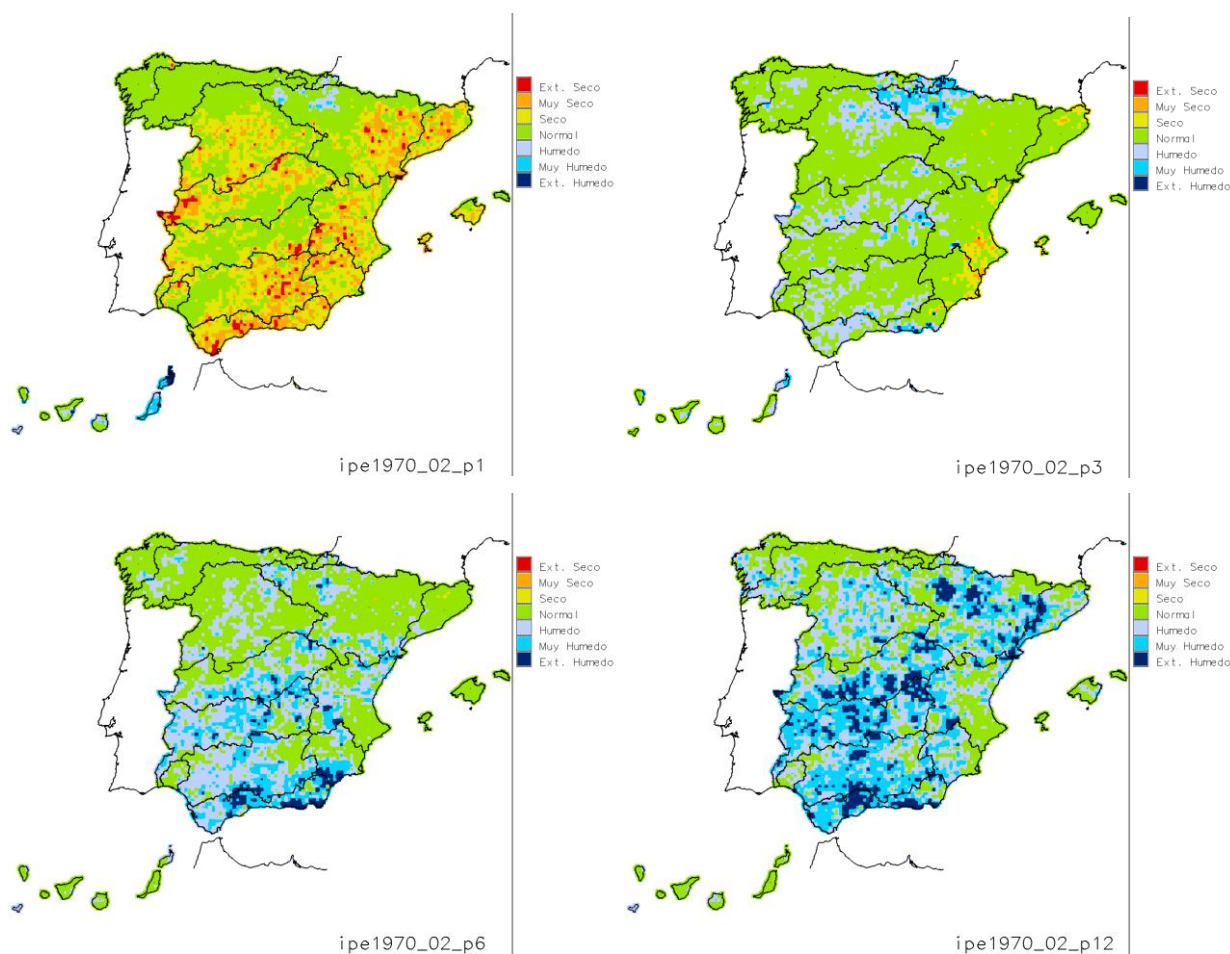


Figura 15. Mapas IPE de pasos 1, 3, 6 y 12 meses en febrero de 1970

El mapa de paso 1 de lluvia permite el estudio de las sequías meteorológicas con paso mensual. El de paso 12, el de las sequías meteorológicas con paso anual. El estudio de las sequías en escorrentías necesita de la agregación en función de la estacionalidad y la región. Por tanto, utilizando los criterios de la Tabla 20 se llega al resultado de la Figura 16. Es decir, se recupera en cada celda el valor del IPE que le corresponde en función de la región SIEH y del mes de cálculo.

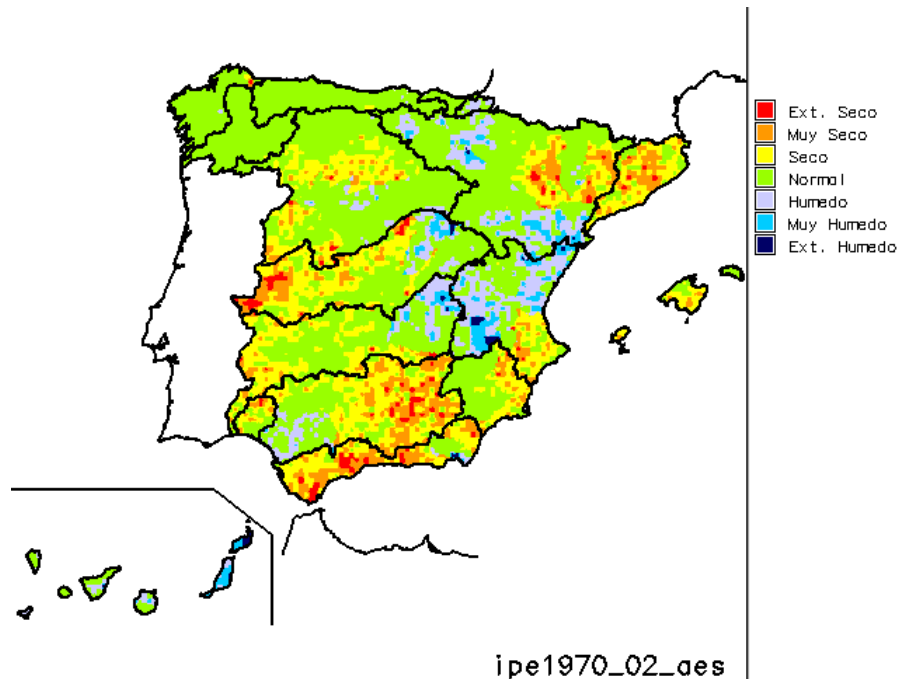


Figura 16. IPE de escorrentías en febrero de 1970

3.3.3 Características de las Sequías Identificadas

Tal como ya se ha adelantado, es usual definir el inicio de las sequías cuando el valor del índice IPE es inferior a -1 . La frecuencia de ocurrencia asociada a este valor es de aproximadamente un 85%, lo que equivale a que solamente el 15% del resto de valores son inferiores a este. La sequía finaliza cuando el valor del índice vuelve a ser positivo (Tallaksen y van Lanen, 2004). Esta regla se ha aplicado para la determinación de sequías en cada una de las celdas de la serie de mapas de IPE derivados de la lluvia y la escorrentía mensual. Como en el caso de las rachas, se entiende que la duración mínima de una sequía debe ser al menos la de una estación climática, es decir, de 3 meses. Sin embargo, la determinación de sequía en una celda no supone la definición de sequía en la región ya que la serie de déficit es continua en el tiempo y prácticamente siempre hay área con recursos inferiores a los normales. Por tanto, para definir una situación extraordinaria, el número de celdas en sequía debe ser suficientemente alto.

En la bibliografía consultada se encuentran recomendaciones en torno a los 10.000 km^2 respecto al orden de magnitud del área mínima en sequía (Dracup et al., 1980; Tallaksen y van Lanen, 2004). El uso de este umbral plantea problemas al compararla con el tamaño de las regiones SIEH, por lo que se ha optado por definir un conjunto de coeficientes de proporcionalidad respecto al área de cada región para estimar el umbral mínimo de sequía. Son del 50% cuando el área de la región es inferior a unos 15.000 km^2 , que es el caso de la mayor parte de las regiones SIEH; del 40% cuando es mayor que el anterior, pero inferior a los 100.000 km^2 , por lo que es de aplicación en la mayoría de Demarcaciones Hidrográficas; y del 30% cuando se estudian las sequías en España. Se fijan atendiendo a la identificación de un número razonable de sequías. Por tanto, para que en una región se dé una sequía, el número de celdas en sequía debe ser superior a un umbral de área mínima estimado como producto entre este

coeficiente y el área de la región considerada. Las áreas en sequía menores al umbral se han definido como áreas secas.

La Figura 17 muestra la serie de áreas secas y en sequía en España utilizando el índice IPE representativo de la lluvia siguiendo los criterios anteriores; la Figura 18 muestra las correspondientes áreas secas y en sequía cuando el índice IPE representa a la escorrentía. No obstante, el uso de valores agregados no aporta información respecto a las cuencas en las que se dan las sequías, ni tampoco a la intensidad, aspecto que ahora se traslada a la superficie total en sequía.

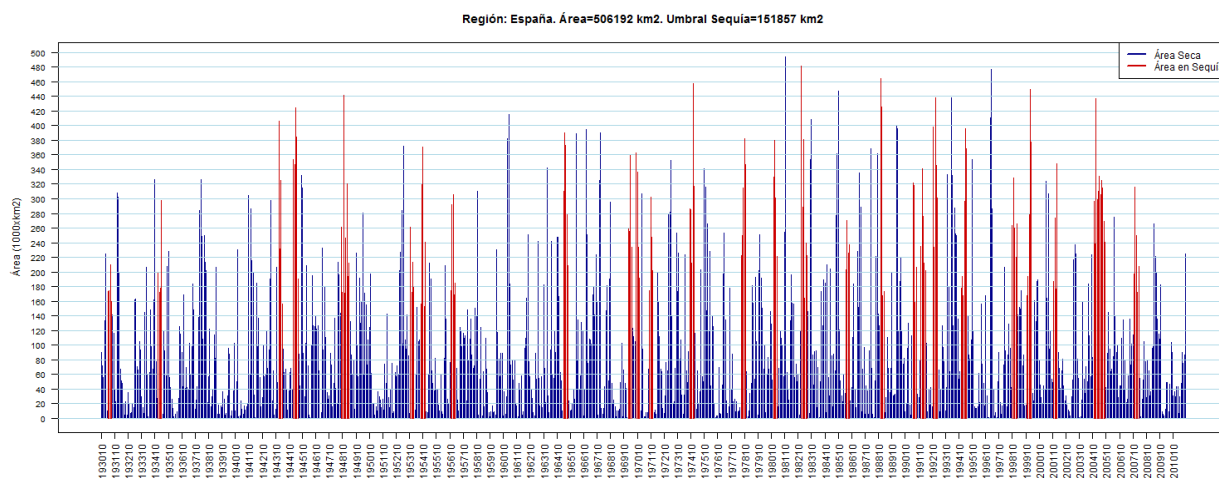


Figura 17. Serie de sequías de lluvia identificadas por área seca en España

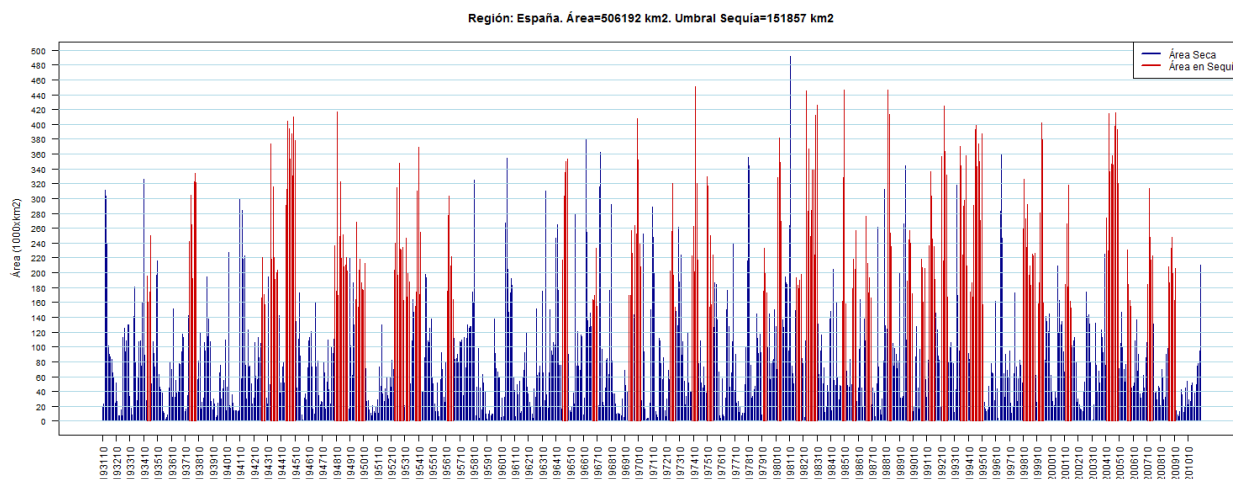


Figura 18. Serie de sequías de escorrentía identificadas por área seca en España

Como cabe esperar, las sequías derivadas de lluvias y escorrentías se inician aproximadamente en las mismas fechas, aunque surgen diferencias en cuanto a su evolución. Una sequía intensa en lluvias puede trasladarse a otra menos intensa en escorrentías pero más duradera. El efecto de laminación de escorrentías puede además provocar la unión de sequías que aparecían dispersas en las lluvias. Se comprueba este efecto en los correlogramas de área seca. Ambos correlogramas dan coeficientes que en los primeros pasos llegan a valores de 0,5 para dar una caída



suavizada con alguna oscilación dependiente de un residuo estacional de los valores estandarizados. El decrecimiento es más suavizado en el caso de las escorrentías (Figura 19).

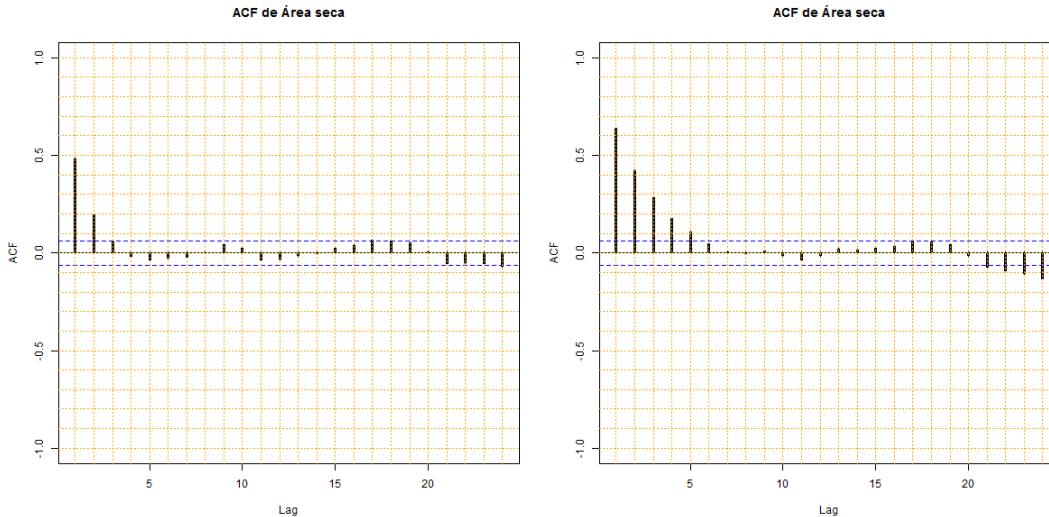


Figura 19. Correlogramas de lluvia (izqda) y escorrentía (drcha)

El resultado anterior invita al uso de modelos ARMA con términos autorregresivos para la simulación de series si bien, el alto coeficiente de sesgo que presentan las series hace necesaria la implementación de transformaciones tipo Box Cox. En los ajustes realizados a las áreas en sequía de las regiones SIEH ha sido habitual encontrar valores del parámetro λ entre 0,2 y 0,4 y órdenes de los modelos ARMA con 2 ó 3 términos autorregresivos.

A continuación se muestran series de sequía de lluvia y escorrentía para algunas regiones en España. La colección completa se incluye en el anejo. La región de las cuencas del Esla tiene un área de aproximadamente 19.500 km² por lo que el umbral de área en sequía se ha tomado del 40%. Aparentemente, las sequías más importantes se dan a mediados de los años 40 y a principio y finales de los años 90.

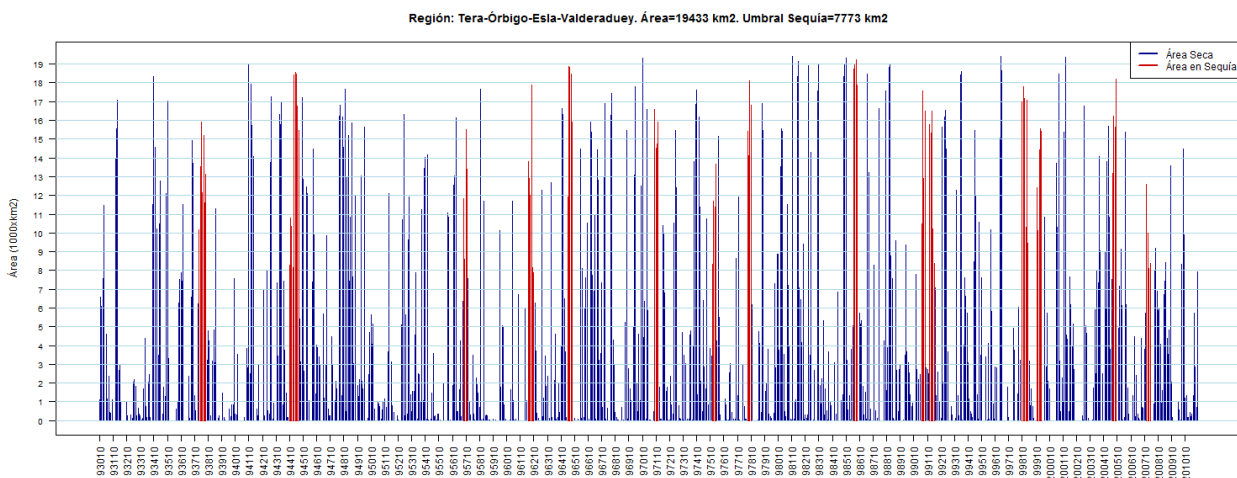


Figura 20. Serie de sequías de lluvia identificadas por área seca en cuencas del Esla

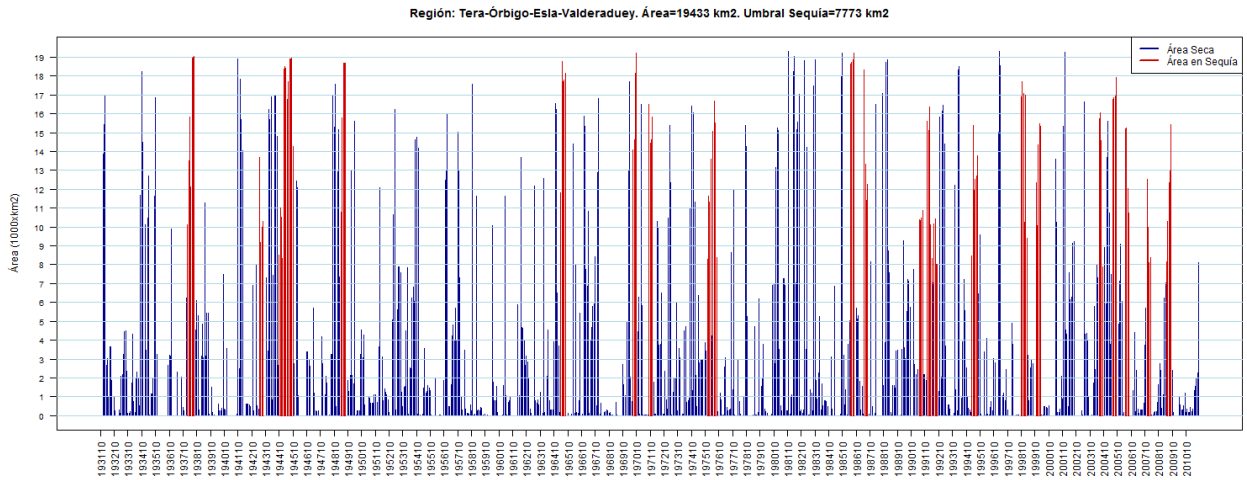


Figura 21. Serie de sequías de escorrentía identificadas por área seca en cuencas del Esla

En la cabecera del Tajo, el área de la región SIEH definida no llega a los 7.300 km². Las sequías se concentran en los años posteriores a la década de los 70. En términos de escorrentía hay eventos de sequía que se dan con secuencias intermitentes de áreas secas en lluvias.

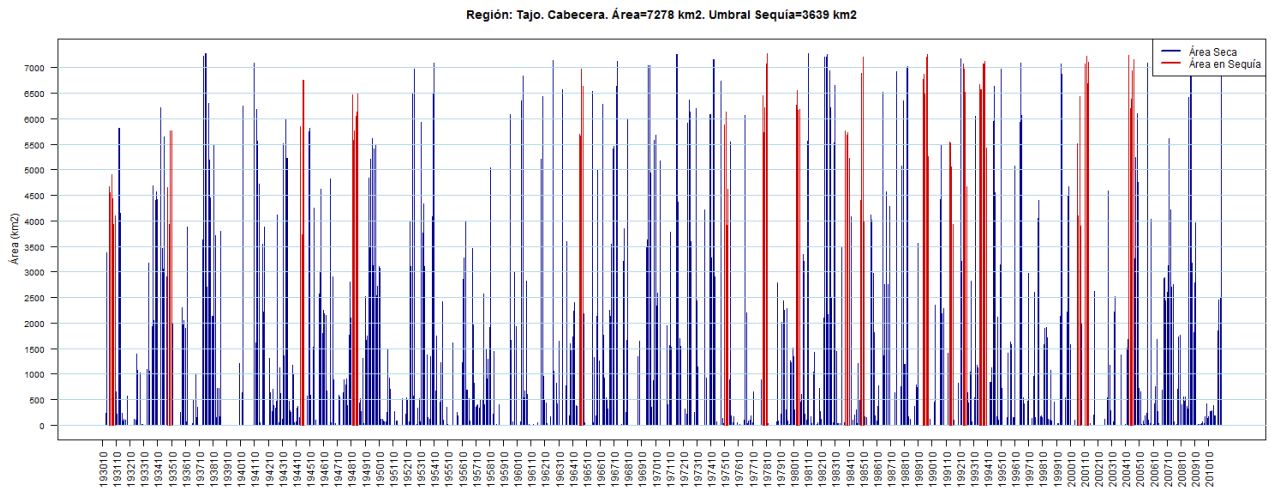


Figura 22. Serie de sequías de lluvia identificadas por área seca en cuencas de cabecera del Tajo



CEDEX

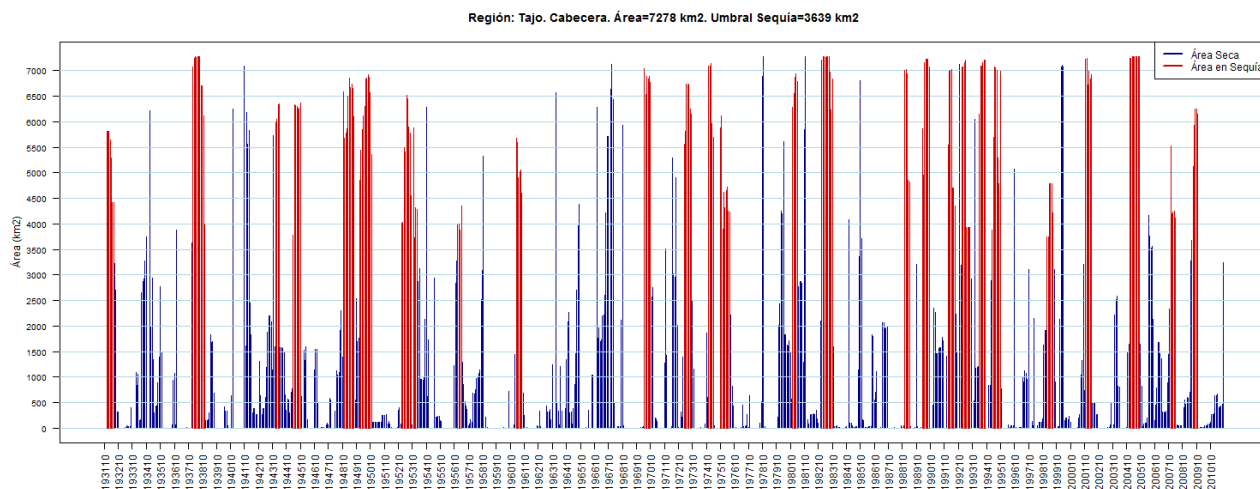


Figura 23. Serie de sequías de escorrentía identificadas por área seca en cuencas de cabecera del Tajo
En las cuencas atlánticas de margen derecha del bajo Guadalquivir se destaca la sequía de mediados de los años 40 y las que se dan desde los años 70 en adelante (Figura 24 y Figura 25).

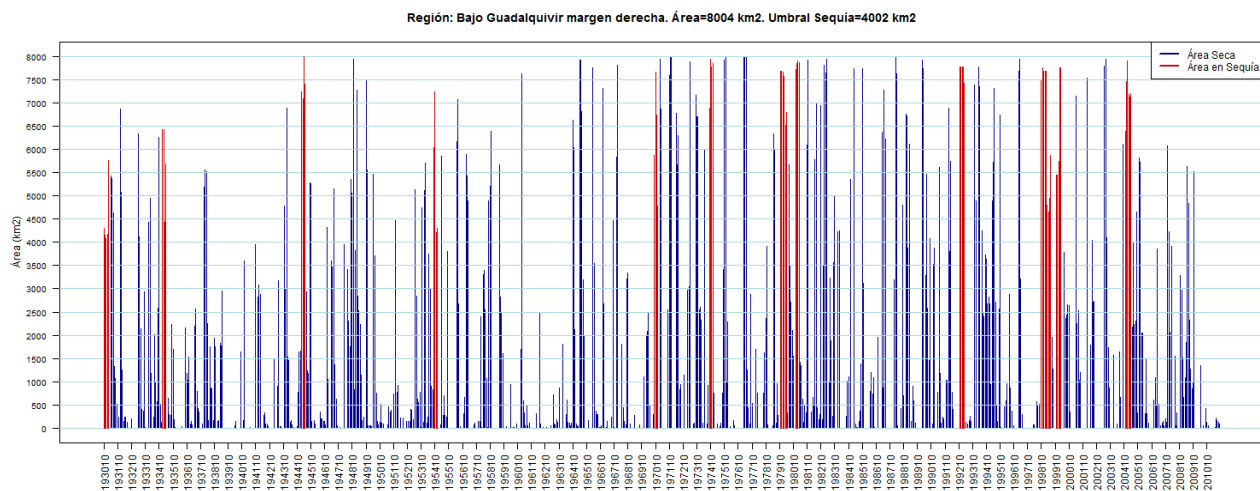


Figura 24. Serie de sequías de lluvia identificadas por área seca en cuencas de margen derecha del bajo Guadalquivir

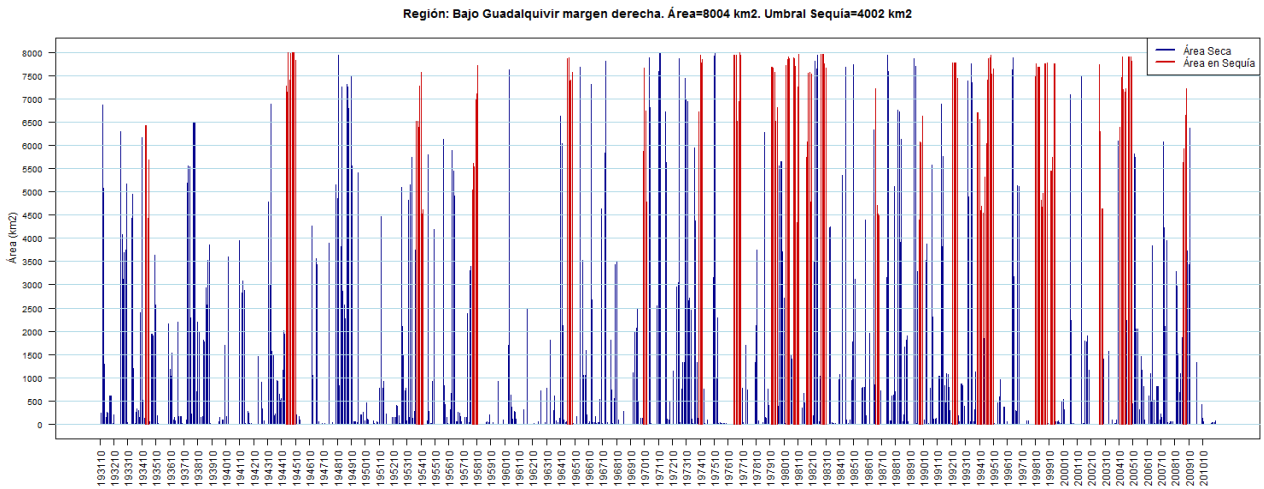


Figura 25. Serie de sequías de escorrentía identificadas por área seca en cuencas de margen derecha del bajo Guadalquivir

La Figura 26 y la Figura 27 se refieren al área de la Demarcación Hidrográfica del Segura. Las sequías se dan intermitentemente durante todo el periodo simulado con prácticamente una sequía significada por década. En términos de escorrentía, las de primera mitad de los años 90, 80 y 40 parecen las más importantes.

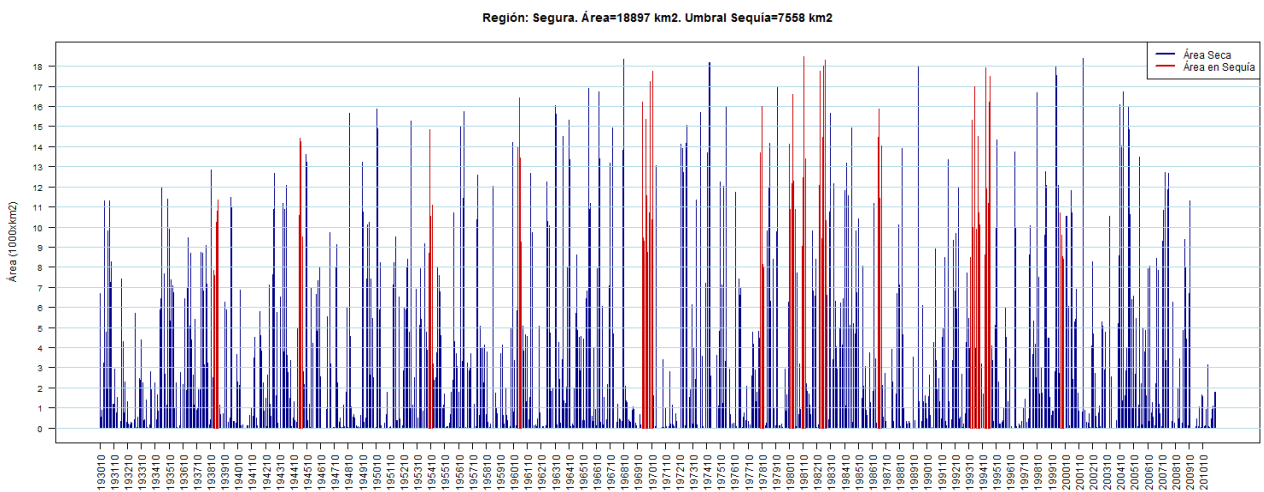


Figura 26. Serie de sequías de lluvia identificadas por área seca en cuencas del Segura



CEDEX

Caracterización Hidrológica de Sequías

Región: Segura. Área=18897 km². Umbral Sequía=7558 km²

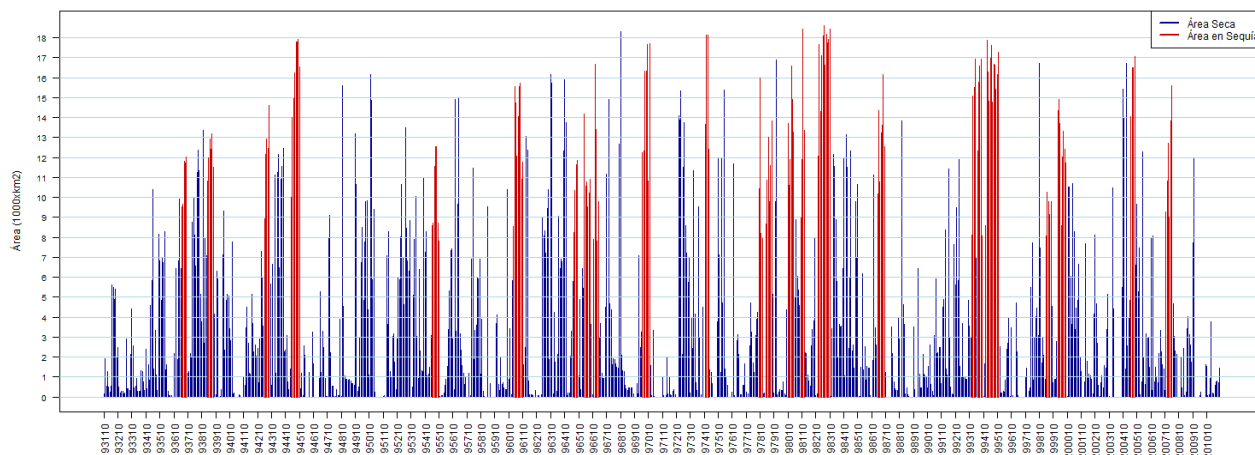


Figura 27. Serie de sequías de escorrentía identificadas por área seca en cuencas del Segura

En la cabecera del Ebro de escasamente 5.500 km² de superficie de cuenca destacan las sequía de los años 40 y de finales de los 80 (Figura 28 y Figura 29).

Región: Ebro. Cabecera. Área=5512 km². Umbral Sequía=2756 km²

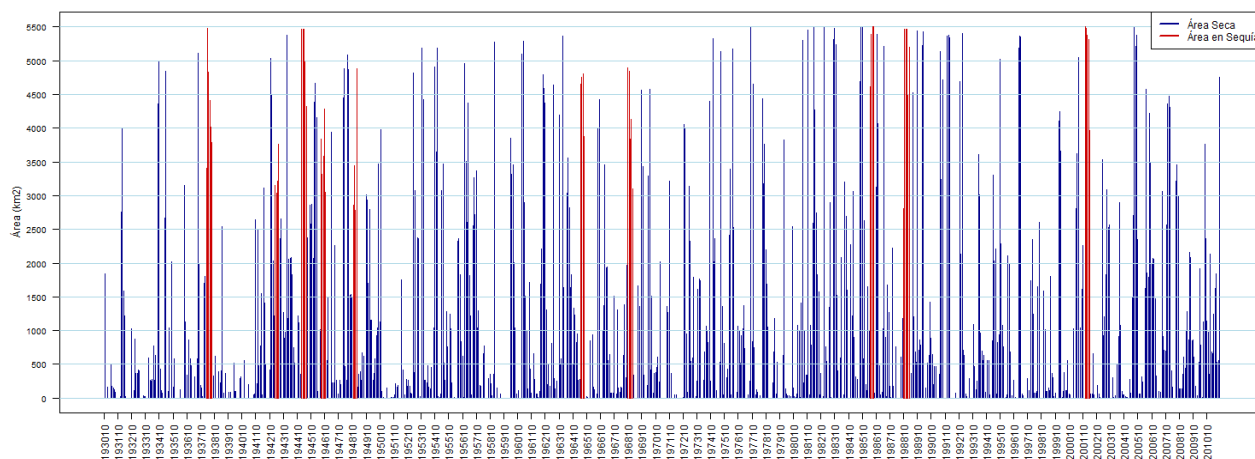


Figura 28. Serie de sequías de lluvia identificadas por área seca en cuencas de cabecera del Ebro

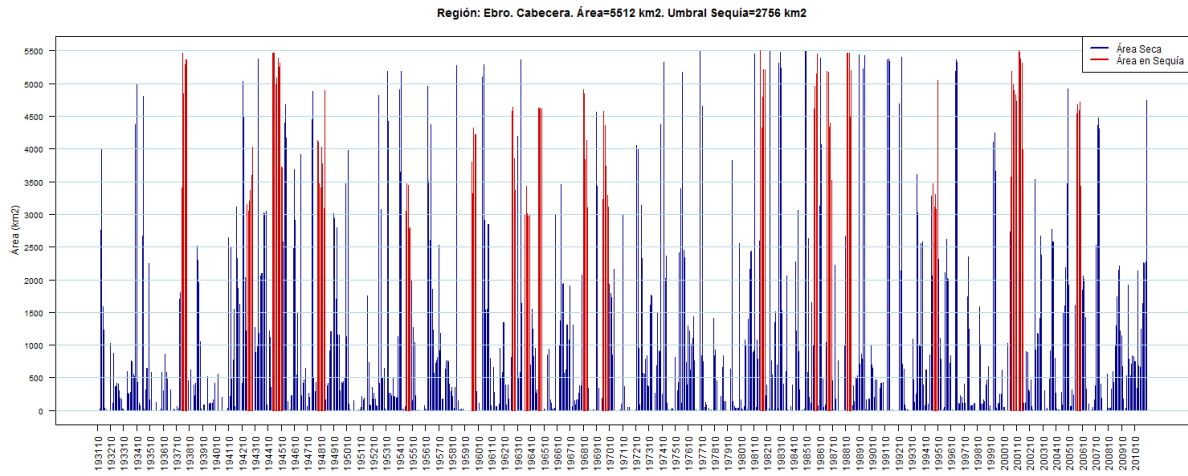


Figura 29. Serie de sequías de escorrentía identificadas por área seca en cuencas de cabecera del Ebro
 En las Cuencas Internas de Cataluña destacan las sequías de los años 40, de finales de los años 50 y la serie intermitente desde los años 90 hasta la de mitad del primer decenio del s. XXI (Figura 30 y Figura 31).

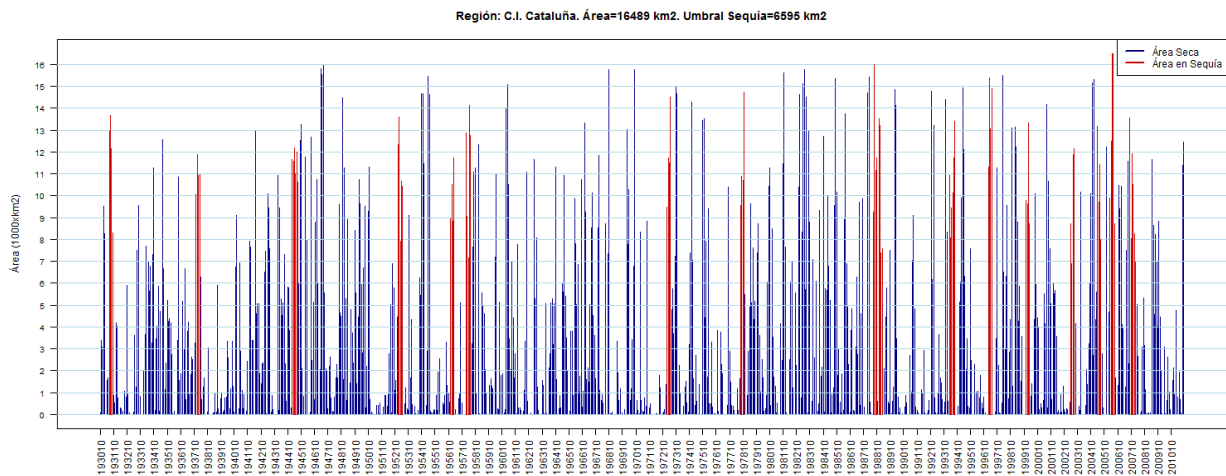


Figura 30. Serie de sequías de lluvia identificadas por área seca en cuencas internas de Cataluña

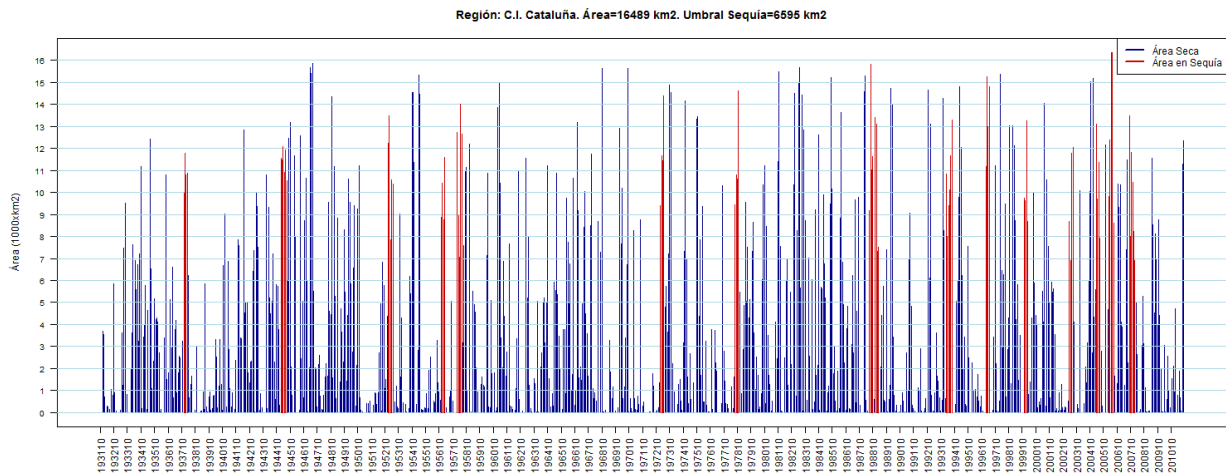


Figura 31. Serie de sequías de escorrentía identificadas por área seca en cuencas internas de Cataluña



3.3.4 Conclusiones Parciales

El índice *IFE* se utiliza con profusión en la caracterización de sequías. Sin embargo, normalmente describe únicamente la frecuencia de lluvias. En los sistemas de indicadores se suelen mostrar los resultados alcanzados con varios pasos de agregación sin concretar cuáles son los necesarios para representar otra variable hidrológica distinta de la lluvia.

En este apartado se ha analizado la relación lineal entre el índice de lluvias agregadas y la escorrentía para componer series de mapas del índice *IFE* que representan a las escorrentías. La relación se comprueba que es dependiente de la estacionalidad y la región. El criterio de selección es optimizar el valor del R^2 de regresión lineal. Las series mensuales de ambas variables se inician en el año hidrológico 1930/31.

El índice *IFE* representa las frecuencias relativas de la lluvia o escorrentía en cada celda de España. Tomando un umbral de área mínima en sequía, se han definido series de sequías regionales que permiten señalar como principales eventos históricos los de los años 40 y la mayor frecuencia de sequías dada desde los años 80 hasta la actualidad en la mayor parte de regiones de España.

3.4 PERIODO DE RETORNO Y CURVAS DDF

3.4.1 Objetivo

El objetivo de este apartado es identificar y caracterizar las sequías ocurridas en España utilizando el periodo de retorno como criterio básico. En este índice se simplifica el tratamiento de sequías, dependientes de al menos 2 variables, déficit y duración. Además, la selección de las frecuencias permite la homogenización de criterios de identificación de sequías en un territorio con la variabilidad hidrológica que se encuentra en España. Los periodos de retorno dan una medida de la peligrosidad del evento natural.

Una vez estimado un periodo de retorno de cada sequía, se pueden estudiar las relaciones entre los alcanzados en precipitaciones y en escorrentías. Inicialmente, podría suponerse su equivalencia, pero la capacidad de regulación natural del ciclo hidrológico y la estación climática en la que se da la lluvia hace que aparezcan diferencias útiles para definir medidas de prevención y alarma al representar la propagación a lo largo del ciclo hidrológico. Otros índices como el de precipitación estandarizada, *IFE*, tratan la propagación a lo largo del ciclo hidrológico a través de coeficientes de agregación cuya estimación, al ser variables las relaciones entre lluvia y ETP a lo largo del año, es difícil.

Se han expuesto las principales definiciones extraídas de la bibliografía consultada para estimar el periodo de retorno de sequías. La metodología seguida en este informe se apoya además de en el punto anterior, en la generación de series sintéticas de lluvia y escorrentía anual con las que identificar un número suficiente de sequías regionales y la combinación de dos distribuciones de frecuencia para caracterizar la de una variable aleatoria dependiente del déficit y duración de las sequías. La distribución gamma de dos parámetros representa el déficit, mientras que la distribución geométrica, la duración. El resultado consiste en la caracterización regional de sequías mediante

curvas *DDF* y por comparación de las correspondientes sequías históricas. En los apartados siguientes se expone en detalle el procedimiento seguido.

3.4.2 Metodología

3.4.2.1 Generación de Series Sintéticas de Precipitación y Escorrentía. Modelos ARMA

Dada la necesidad de obtener un número suficiente de sequías para ajustar la función de distribución bivariada dependiente de la duración y el déficit, se han parametrizado modelos ARMA de cada una de las series anteriores. Las series sintéticas generadas tienen una longitud de 50.000 años. La parametrización se apoya en el criterio de Akaike y en la similitud de las funciones de autocorrelación y autocorrelación parcial. En la precipitación aparecen términos de media móvil (MA) y autorregresivos (AR) que se refuerzan al considerar la escorrentía. No se han corregido las tendencias, lo que se supone hace que aparezcan con mayor peso los términos autorregresivos en lluvia y escorrentía. Con series mensuales y dada la estacionalidad de las series, se utilizarían modelos integrados, ARIMA. Otra opción la constituye el modelo de Fiering-Jackson con estacionalización previa (Peña, 2010; Salas et al., 1985; Fiering y Jackson, 1971).

Tabla 21. Órdenes de modelos ARMA de las series anuales de precipitación y escorrentía

Cuenca	ARMA(p,q) PRECIPITACIÓN		ARMA(p,q) ESCORRENTÍA	
	Orden	p	q	p
Miño-Sil	0	2	2	1
Cantábrico	0	2	2	2
Norte III	0	2	2	1
Cantábrico COMPLETO sin C.I. País Vasco	0	2	2	0
C.I. País Vasco	0	2	2	1
Norte III y País Vasco	0	2	2	1
C.I. Galicia Costa	0	2	2	1
Norte COMPLETO	0	2	2	0
Tera-Órbigo-Esla-Valderaduey	1	2	1	1
Carrión-Pisuerga-Arlanza	1	2	2	0
Alto Duero-Riaza	0	2	2	0
Adaja-Cega-Bajo Duero	1	2	2	0
Tormes-Águeda	1	2	2	0
Duero COMPLETO	1	2	2	0
Cabecera	1	2	2	0
Henares-Tajuña	1	2	2	0
Jarama-Guadarrama	1	2	2	2
Alberche	1	2	1	1
Tajo Medio margen izquierda	1	2	2	1
Bajo Tajo margen derecha	0	2	2	1
Bajo Tajo margen izquierda	1	2	2	1
Tajo COMPLETO	1	2	2	1
Cuenca Alta	1	2	2	1
Jabalón-Bullaque	1	2	2	2
Centro	0	2	2	1
Guadiana II	0	2	2	0
Guadiana COMPLETO	1	2	2	2
Cabecera margen derecha	1	2	2	1
Guadiana Menor	1	2	2	1
Guadalquivir Medio margen izquierda	0	2	2	2
Guadalquivir Medio margen derecha	0	2	2	1
Bajo Guadalquivir margen izquierda	1	2	2	1
Bajo Guadalquivir margen derecha	1	2	2	2
Almonte-Marismas	1	2	2	0
Alto Genil	0	2	2	1
Guadalquivir COMPLETO	1	2	2	1
Sistema I	1	2	2	1



CEDEX

Cuenca	ARMA(p,q) PRECIPITACIÓN		ARMA(p,q) ESCORRENTÍA		
	Orden	p	q	p	q
Sistema II	1	2	2	2	
Sistema III	1	0	2	2	
Sistema IV	1	2	2	0	
Sistema V	1	2	2	2	
C.I. Andalucía. Mediterráneo	1	2	2	2	
Tinto-Piedras-Odiel	0	2	2	0	
Guadalete-Barbate	1	2	2	1	
C.I. Andalucía. Atlántico	1	2	2	1	
C.I. Andalucía	1	2	2	1	
Cabecera	0	2	2	2	
Margen izquierda	0	1	2	2	
Margen derecha	0	2	2	2	
Litoral	1	2	2	0	
Segura COMPLETO	1	2	2	2	
Norte	1	2	2	0	
Alto Turia	0	2	2	0	
Bajo Turia	0	2	2	0	
Alto Júcar	1	1	2	0	
Júcar Medio	1	1	2	1	
Bajo Júcar	1	2	2	0	
Sur	0	2	2	0	
Júcar COMPLETO	1	2	2	2	
Cabecera	0	2	2	0	
Tirón-Najerilla-Iregua	0	2	2	0	
Batas-Zadorra-Inglares-Irati-Arga-Ega	1	2	2	0	
Margen derecha desde el Leza hasta el Huecha	1	1	1	1	
Aragón-Arbas	0	2	2	0	
Jalón-Jiloca	1	2	2	0	
Gállego-Cinca	0	2	2	2	
Ésera-Noguera Ribagorzana	2	1	2	0	
Segre	2	1	2	1	
Huerva-Aguas Vivas-Martín-Guadalupe-Matarraña	2	1	2	1	
Garona	1	0	1	2	
Ebro COMPLETO	1	2	2	2	
C.I. Cataluña	1	1	2	1	
España. Península Ibérica	1	2	2	1	
Baleares	1	0	2	1	
Canarias	2	0	2	2	
España COMPLETA	1	1	2	1	

En las series sintéticas generadas hay valores negativos que se transforman a valores nulos aunque no existen en ninguna de las series históricas anuales anteriores.

3.4.2.2 Identificación y Caracterización de Sequías en las Series Sintéticas

Una vez generadas las series sintéticas de 50.000 años, se identifican las sequías acaecidas. Las sequías se definen como los periodos de años con precipitación o escorrentía anual continuamente inferiores a la mediana de la serie. Es decir, tanto el umbral de inicio como el de recuperación de la sequía son la mediana, parámetro que parece razonable considerando el paso anual de tiempo. Las probabilidades de año seco o húmedo son por tanto del 50%.

Asimismo, no se ha considerado necesario utilizar ningún parámetro de suavizado para conectar en una racha años en sequía interrumpidos por un algún otro húmedo.

A pesar de la longitud de las series sintéticas, 50.000 años, se ha obtenido un número reducido de sequías con duraciones altas, de más de 10 años. Es un aspecto que

coincide con conclusiones referidas en las referencias consultadas (Salas et al., 2005). La Figura 32 muestra el número de sequías respecto a las duraciones de 1 a 10 años y la notable reducción cuando se consideran las de duración de 6 ó más años.

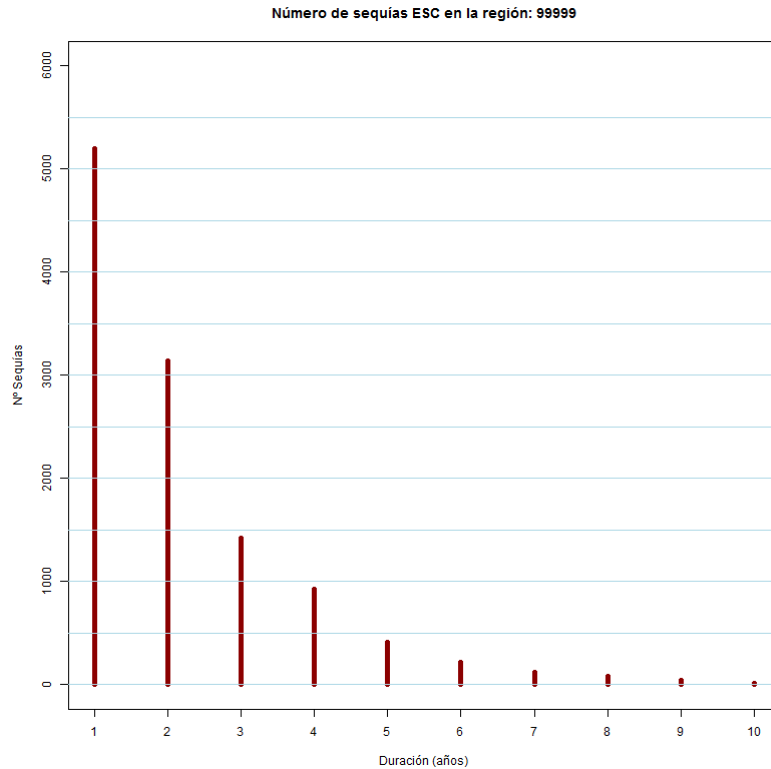


Figura 32. Clasificación por duración de las sequías identificadas en las series sintéticas

3.4.2.3 Curvas DDF Regionales y Ajuste de la Distribución Bivariada y del Periodo de Retorno

Dados los eventos de sequía de las series sintéticas, se ajustan las distribuciones bivariadas mediante los criterios del apartado 2.3 a series de lluvia y escorrentía regionales. Se obtienen por tanto las curvas *DDF* sobre las que se representan las sequías regionales identificadas durante el periodo de estudio 1930/31-2010.



3.4.3 Identificación y Caracterización de Sequías-Periodo 1930/31-2010/11

La Figura 33 representa el conjunto de curvas *DDF* correspondiente a la precipitación y a la escorrentía de España. El orden de magnitud de los déficit de lluvia es mayor que el de la escorrentía y en la figura, la curva representativa de un periodo de retorno de precipitaciones aparecerá por encima de la correspondiente al mismo periodo de retorno en escorrentías.

Siguiendo la misma definición de sequías, se pueden identificar en el periodo comprendido entre los años hidrológicos 1930/31 y 2010/11 las sequías de lluvia y escorrentía de cada región. El umbral de inicio y recuperación se fija de la misma manera en la mediana de la serie. Dada una sequía, se obtiene la duración y el déficit medio anual y se representa en la misma

Figura 33 para obtener una lectura del periodo de retorno. Asimismo, el periodo de retorno se obtiene también analíticamente dado el déficit total acumulado y la duración de la sequía según la Ec. 2-14.

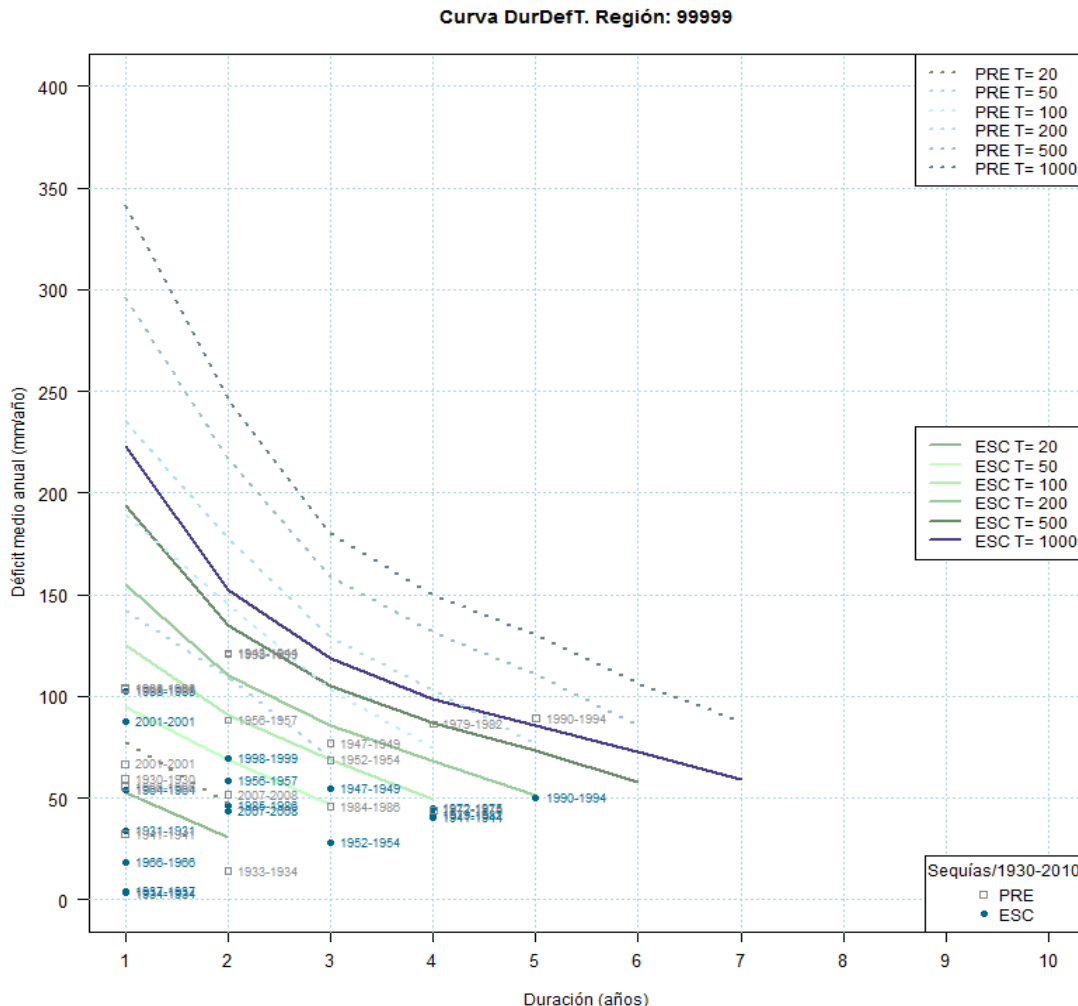


Figura 33. Curvas de DDF de sequías en lluvias y escorrentías anuales de la Península Ibérica y sequías identificadas en el periodo 1930/31-2010/11

La Figura 34 muestra la caracterización de sequías de valores promediados de precipitación y escorrentía en el conjunto de cuencas españolas de la Península Ibérica. En cada una de las regiones SIEH se realiza la misma operación, tal como muestra la Figura 34. Las curvas *DDF* representan una relación entre duración y déficit medio anual regional de precipitación (PRE) y escorrentía (ESC). Sobre cada gráfica se han representado las relaciones entre duración y déficit medio anual de las sequías históricas del periodo 1930/31-2010/11.

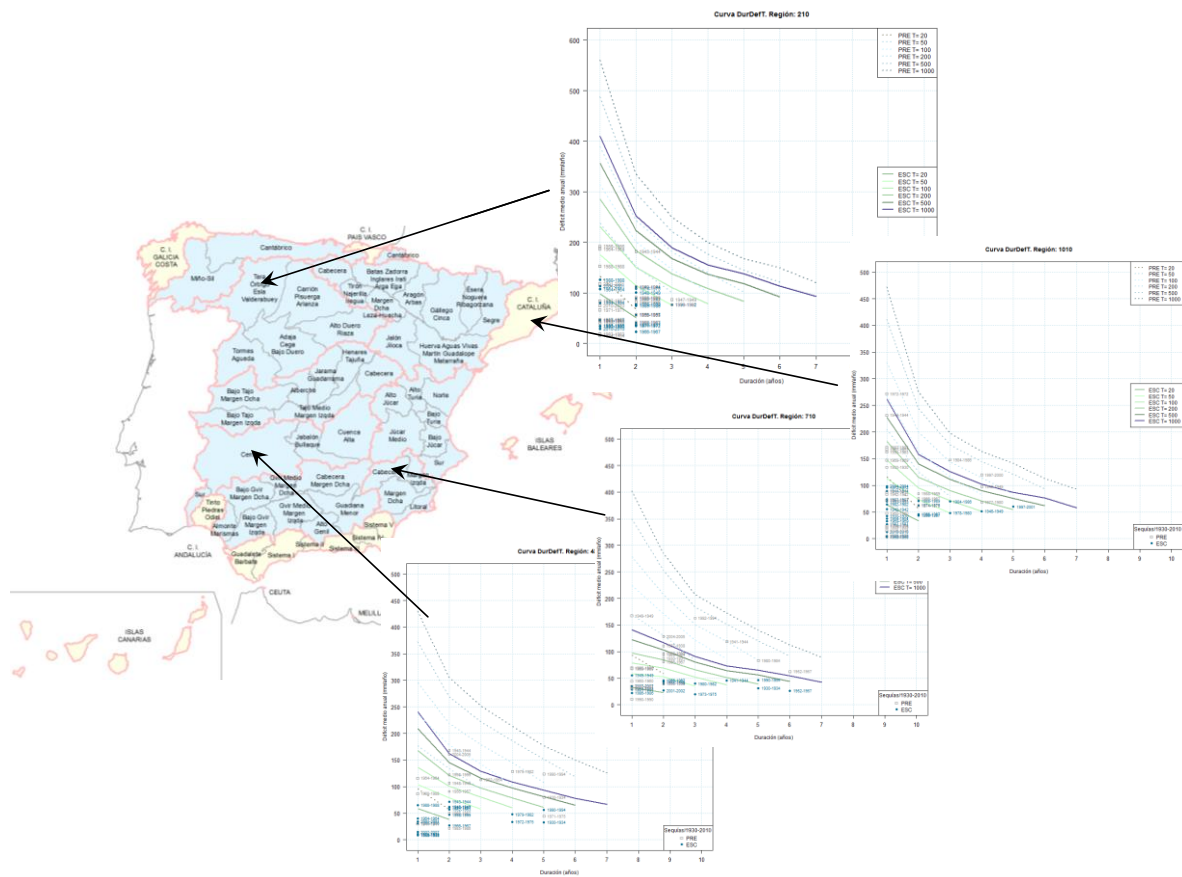


Figura 34. Caracterización de sequías en España

A continuación se muestran las curvas *DDF* de algunas regiones españolas. En el anejo se incluye la colección completa de curvas.



CEDEX

En la cuenca del Esla (Figura 35) las sequías acaecidas durante el periodo de estudio dan bajos periodos de retorno. El más alto se alcanza con las lluvias anuales de los años 1943/44 y 1944/45 con periodo de retorno ligeramente inferior a los 100 años. La sequía se inicia en 1943/44 con intensidades suaves que se hacen máximas en 1944/45. Un factor que agrava este evento es la ocurrencia de otra sequía de lluvias entre 1947/48 y 1949/50. Ambas sequías se reflejan en escorrentías con periodos de retorno ligeramente inferiores.

Otra sequía de lluvia de unos 100 años de periodo de retorno es la de 5 años de duración comprendida entre 1990/91 y 1994/95 que en escorrentías se descompone en otras dos. La de 1990/91-1992/93 es de 50 años de periodo de retorno; la de 1994/95, de unos 20 años.

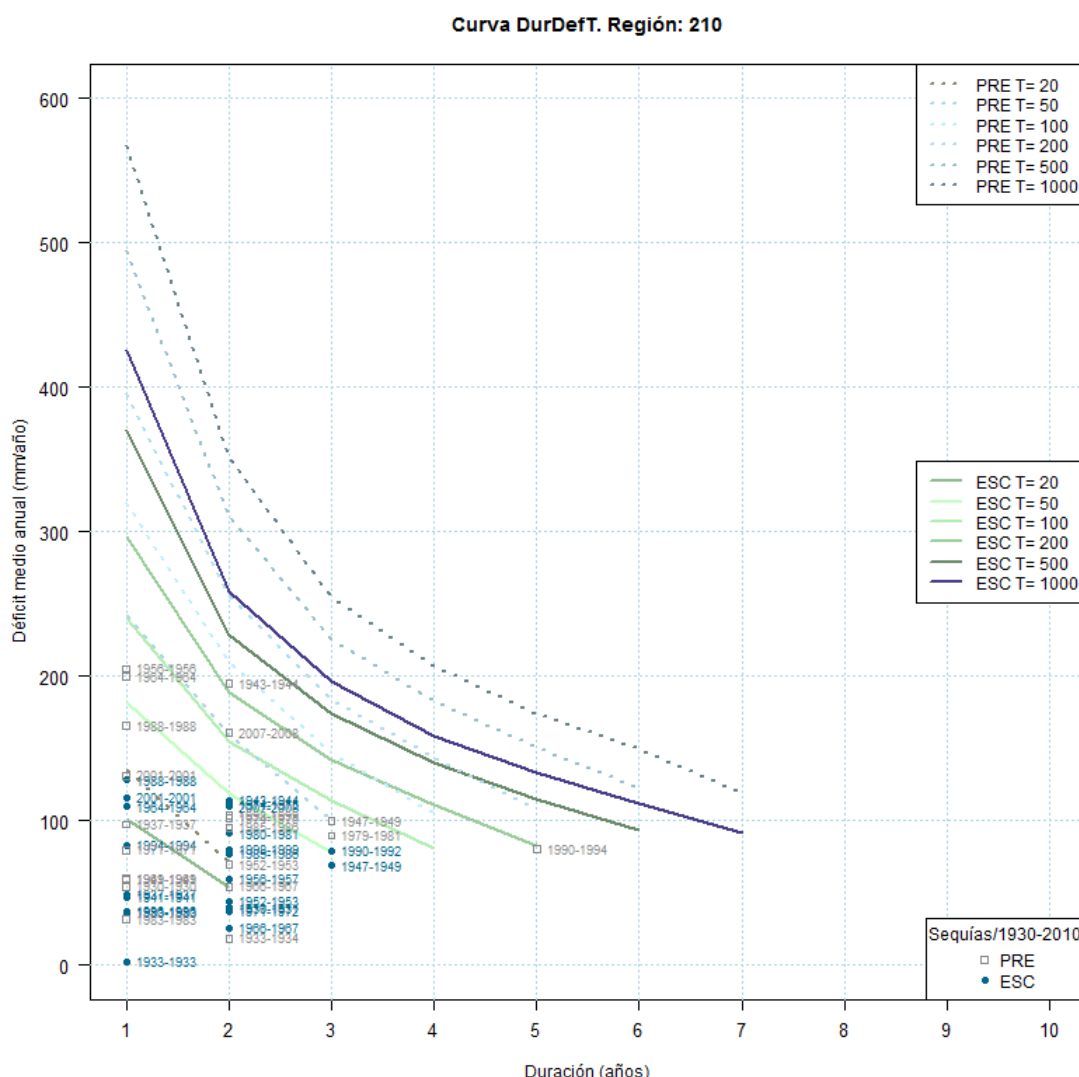


Figura 35. Curvas de DDF de sequías en lluvias y escorrentías anuales del Esla en el Duero y sequías identificadas en el periodo 1930/31-2010/11

En la cabecera del Tajo (Figura 36) la peor sequía en escorrentías ocurre entre 1988/89 y 1994/95 con una duración de 7 años y un periodo de retorno cercano a los 500 años. Su causa se encuentra en la secuencia de sequías comprendidas entre 1991/92-1994/95 y la de 1988/89-1989/90 con 4 años y 2 años de duración respectivamente.

Otra sequía de importancia se da entre los años 1979/80 y 1983/84 con origen en la de lluvias de 1979/80 y 1982/83, ambas con algo más de 100 años de periodo de retorno. También pueden destacarse las de 2 años de duración entre 1948/49 y 1949/50 con periodos de retorno entre 50 y 100 años y la de escorrentías de 3 años entre 1942/43 y 1944/45 con déficit de lluvias iniciado un año antes.

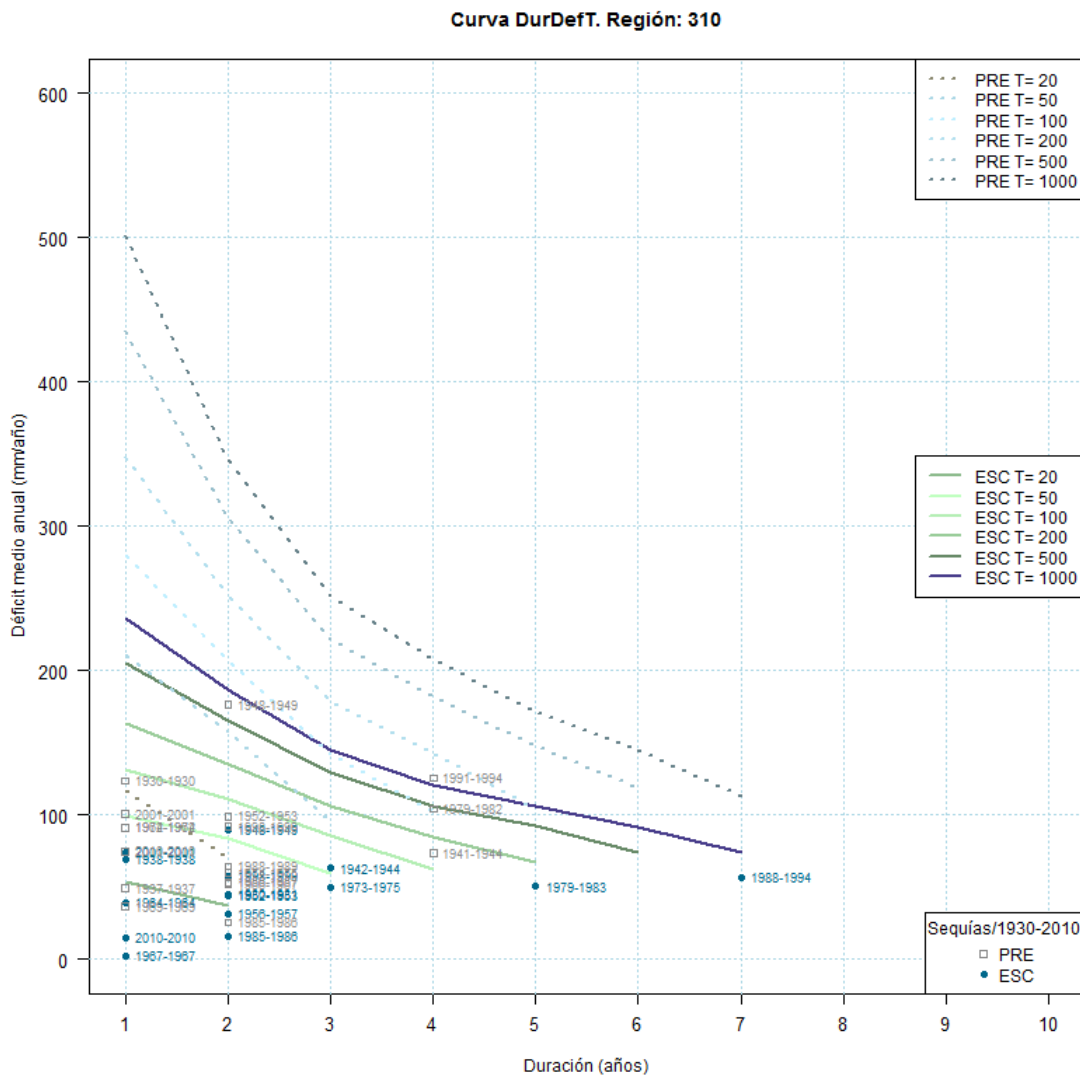


Figura 36. Curvas de DDF de sequías en lluvias y escorrentías anuales de la cabecera del Tajo y sequías identificadas en el periodo 1930/31-2010/11



En las cuencas de margen derecha del bajo Guadalquivir (Figura 37) vuelven a señalarse las sequías de principios de los años 80 y de la primera mitad de los años 90, 1979/80-1982/83 y 1990/91-1994/95, de 4 y 5 años de duración. Ambas superan los 200 años de periodo de retorno en lluvias, pero en escorrentías la primera llega escasamente a los 100 y la segunda a los 200.

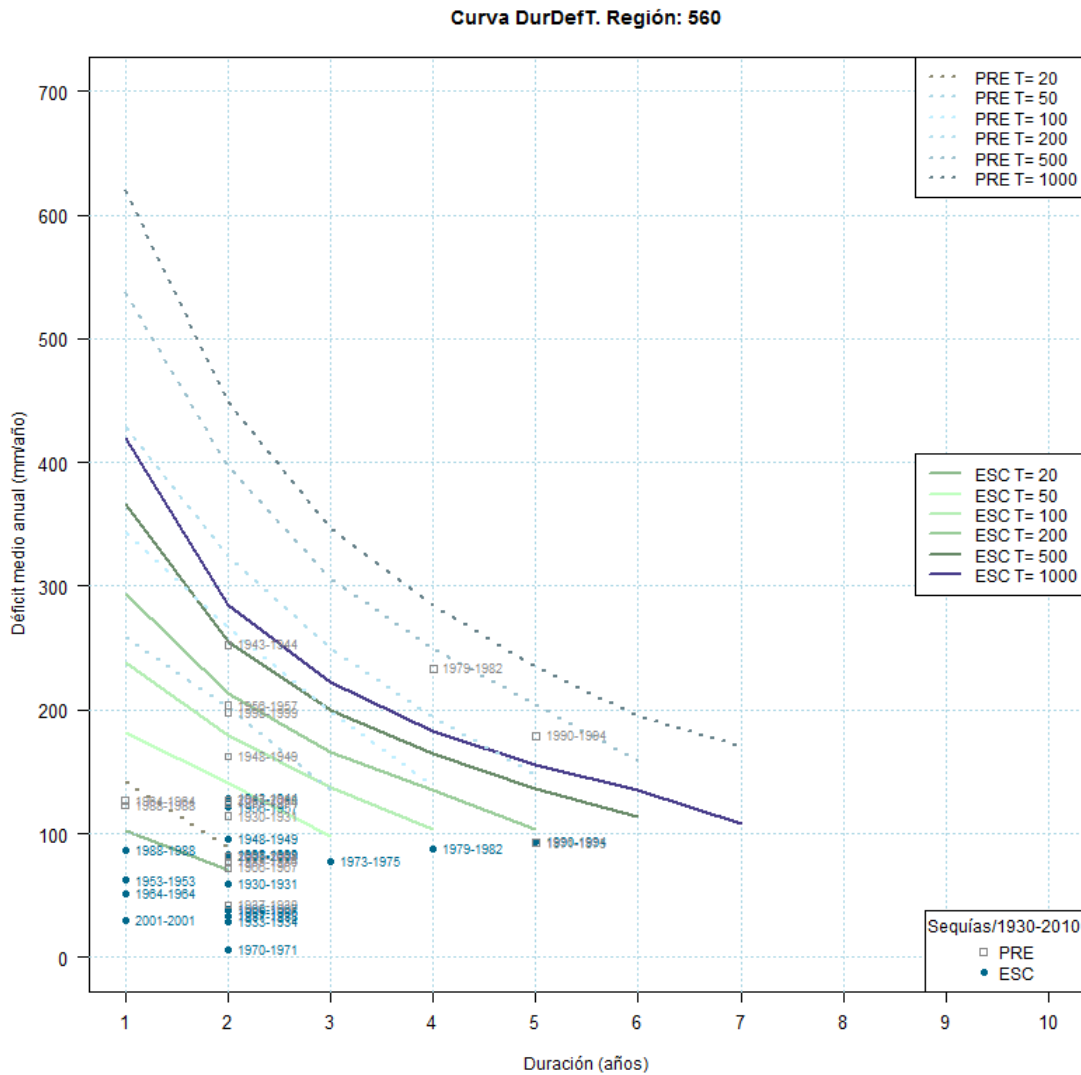


Figura 37. Curvas de DDF de sequías en lluvias y escorrentías anuales en cuencas de margen derecha del bajo Guadalquivir y sequías identificadas en el periodo 1930/31-2010/11

El comportamiento de las sequías de lluvia y escorrentía difiere significativamente en la cuenca del Segura (Figura 38) Debido a la escasez del recurso hídrico, las curvas DDF de escorrentía están agrupadas y, especialmente en el caso de las escorrentías muestran un carácter plano con importantes incrementos de periodo de retorno y pequeños incrementos de déficit.

En cuanto a las lluvias, las peores sequías se dan durante los periodos 1980/81-1984/85 y 1992/93-1994/95 de 5 y 3 años de duración y retornos entre 200 y 500 y entre 100 y 200 años. En escorrentías se identifican las sequías entre 1990/91-1994/95, relacionada con la secuencia de sequía en lluvias de 1990/91 y 1992/93-1994/95, y la de 1980/81-1983/84. Tienen duraciones de 5 y 4 años y retornos de 200 y 100 años respectivamente. Otras sequías de escorrentía comparables a estas son las de los años 1930/31-1934/35 y 1954/55-1957/58.

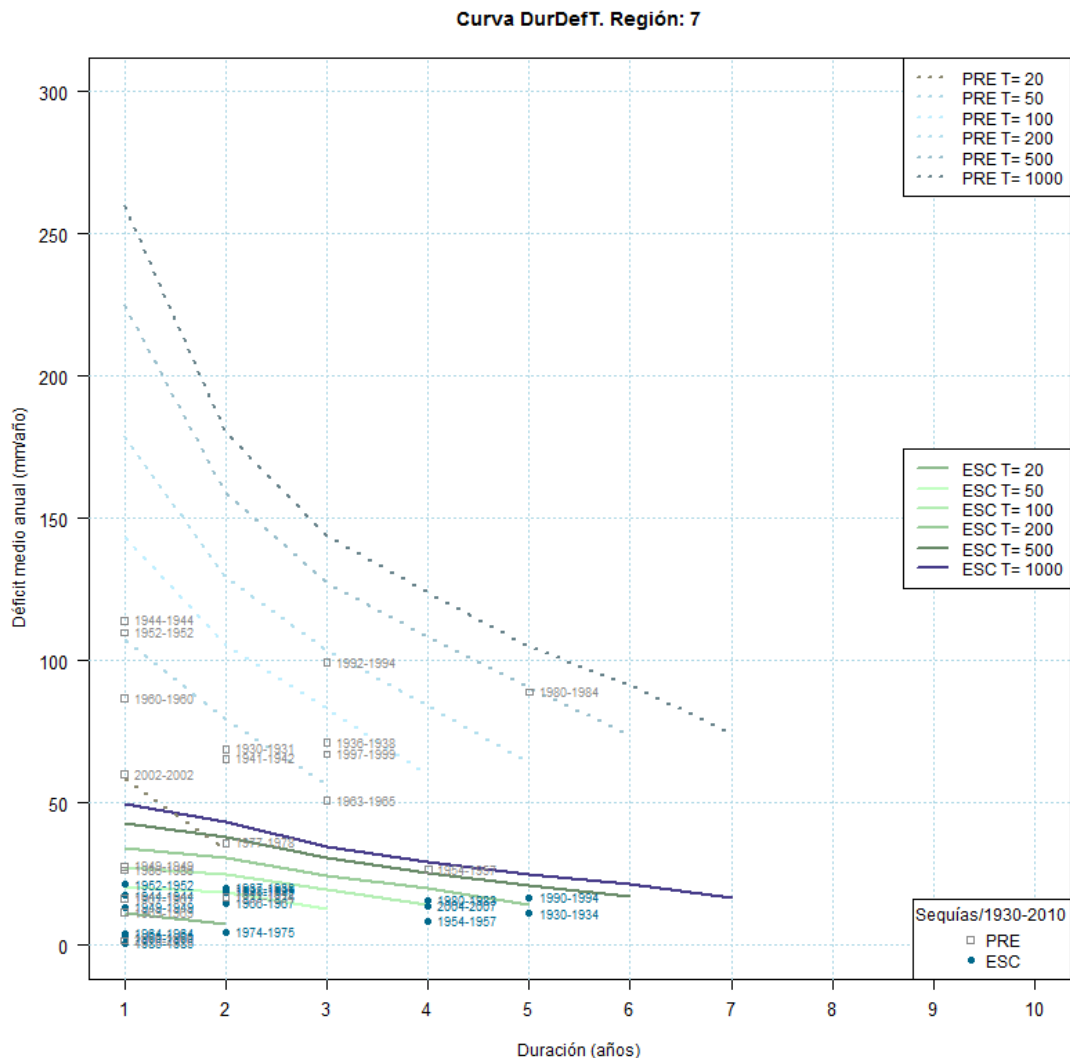


Figura 38. Curvas de DDF de sequías en lluvias y escorrentías anuales en la cuenca del Segura y sequías identificadas en el periodo 1930/31-2010/11



Entre las sequías identificadas en la cabecera del Ebro (Figura 39) destaca la de escorrentías con 9 años de duración desde 1941/42 hasta 1949/50. Las correspondientes sequías en lluvia son las de 1941/42-1945/46 y la 1947/48-1949/50 con altos periodos de retorno. Otras sequías importantes en lluvias son las de 1988/89-1990/91, 1983/84-1986/87 y 1997/98-2002/03 con periodos de retorno más altos que las asociadas en escorrentías.

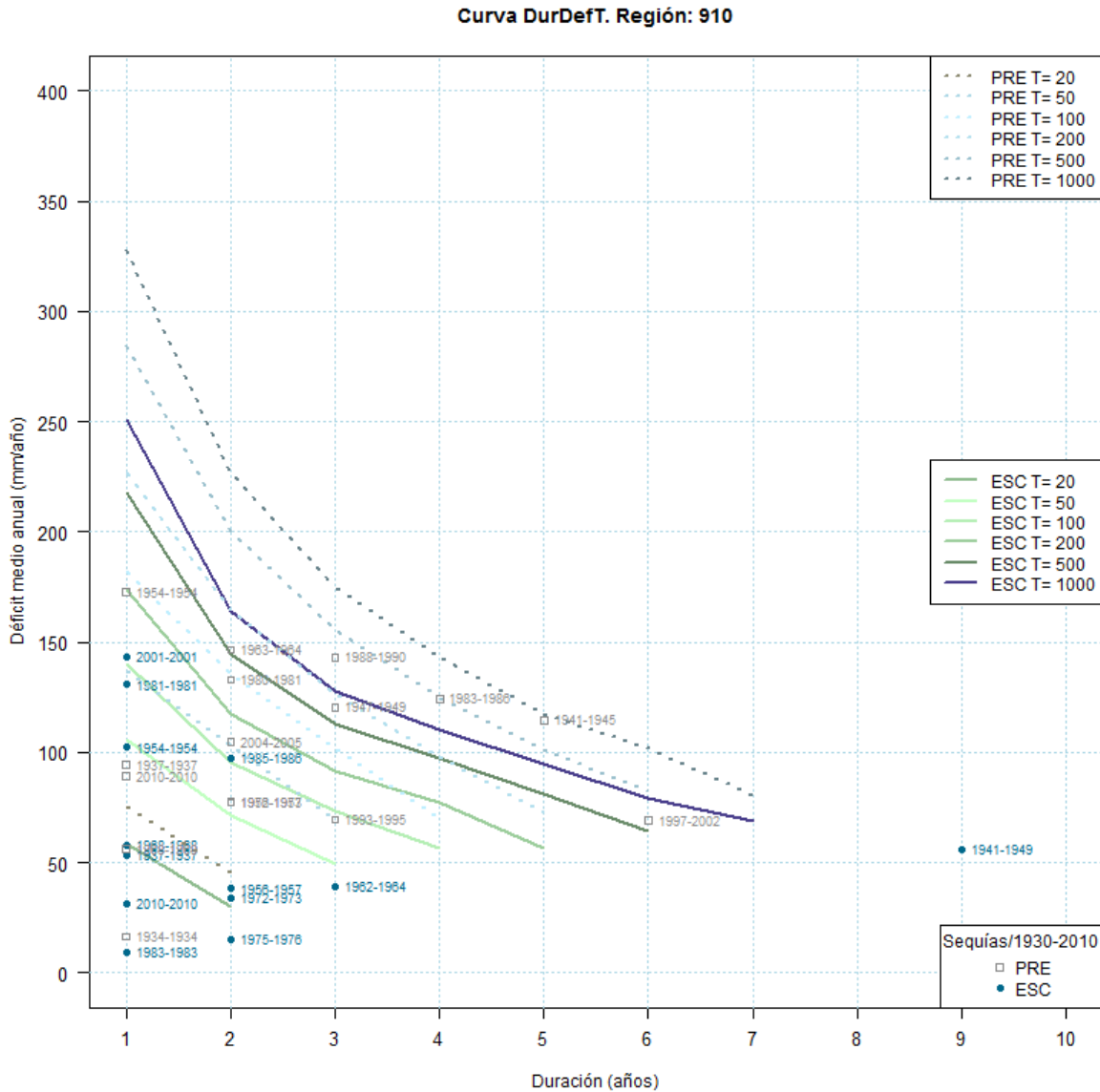


Figura 39. Curvas de DDF de sequías en lluvias y escorrentías anuales de la cabecera del Ebro y sequías identificadas en el periodo 1930/31-2010/11

En las cuencas internas de Cataluña (Figura 40) se distinguen dos sequías en lluvias con periodos de retorno superiores a los 200 años. Son las comprendidas entre 2004/05 y 2008/09 y entre 1984/85 y 1986/87. En escorrentías la primera retrasa su inicio hasta el año 2006/07 para finalizar en el año 2009/10.

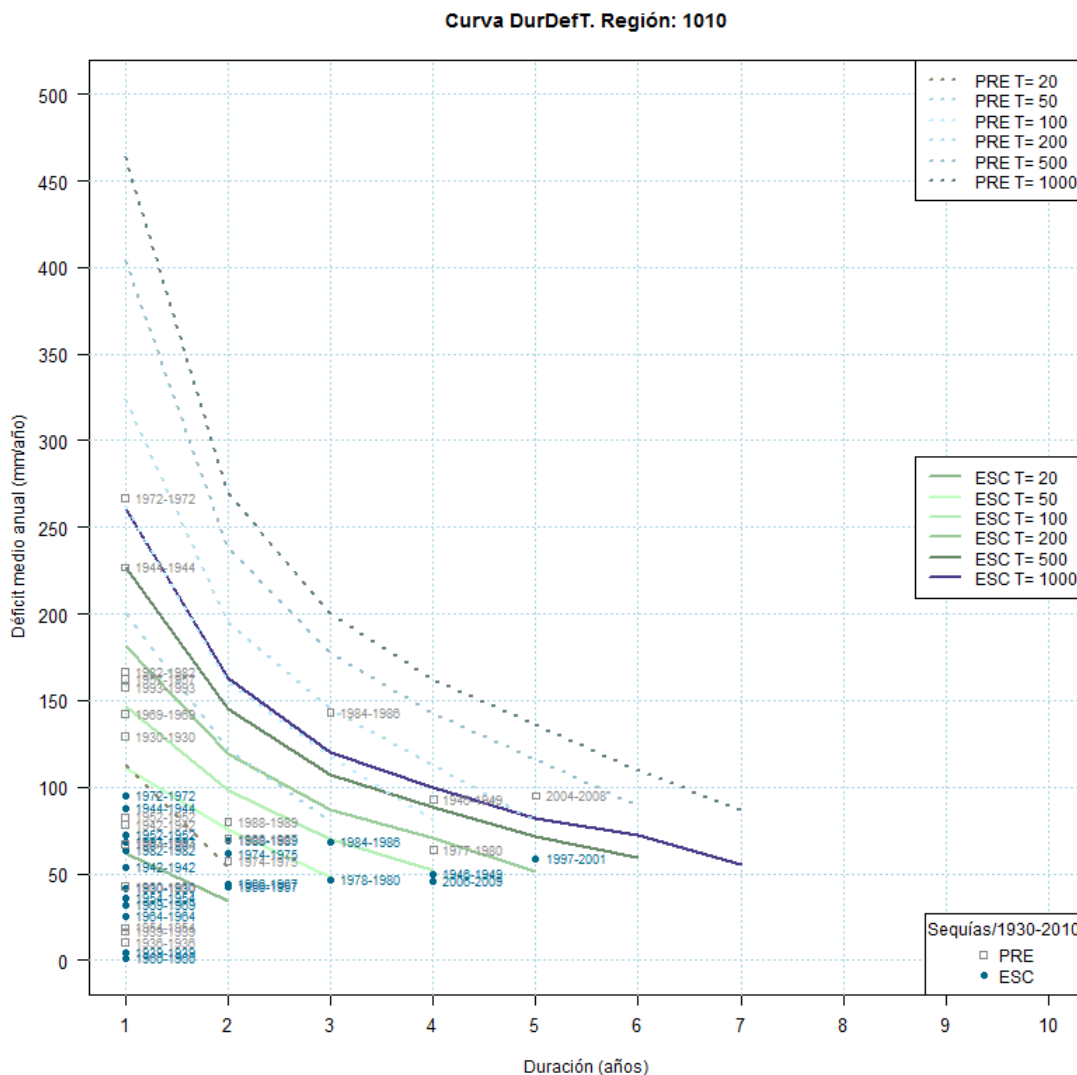


Figura 40. Curvas de DDF de sequías en lluvias y escorrentías anuales de las cuencas internas de Cataluña y sequías identificadas en el periodo 1930/31-2010/11

3.4.4 Conclusiones Parciales

La metodología anterior permite la definición en un único índice, periodo de retorno, de la gravedad de cada sequía regional. Representa la peligrosidad o frecuencia de ocurrencia de un evento dependiente de la duración y de la intensidad del déficit. El manejo del índice del periodo de retorno permite establecer relaciones de orden entre las sequías y establecer cuáles son las peores sequías de una serie histórica lo que es de utilidad en el diseño y planificación hidrológica cuando se estudia la capacidad de la infraestructura hidráulica frente a las sequías. En el caso representado en la



CEDEX

Figura 33 que caracteriza las sequías en España, la sequía de duración 5 años del periodo 1990/91-1994/95 es la peor con más de 200 años en precipitación y de casi esos 200 años en escorrentía.

Los periodos de retorno estimados con series regionales en España permiten comprobar que las sequías de lluvia dan periodos de retorno normalmente más altos que los correspondientes a la escorrentía. Se han identificado sequías diferentes en función de la variable y se podría deducir que hay un efecto de laminado en escorrentías que hace menor el número de sequías y de mayor duración. Así, en la

Figura 33 se pueden identificar 2 sequías en lluvias, de duración 1 y 2 años durante el periodo 1941/42-1944/45; en escorrentías se corresponde a una única. Dentro de estas consideraciones y aunque existen diferentes procesos hidrológicos causantes de los déficit en lluvia y escorrentía, el uso del periodo de retorno en series de lluvia permite establecer niveles de previsión en sistemas de indicadores hidrológicos, así como registrar la evolución de sequías en estas variables.

Por último, dada la caracterización de sequías en términos de curvas *DDF*, se presenta la posibilidad de estudiar los cambios de las curvas *DDF* a lo largo de un periodo histórico o estudiar los impactos en sequías tomando la referencia de diferentes escenarios regionalizados de cambio climático.

3.5 ÍNDICE NDDI Y SEQUÍAS RECIENTES EN ESPAÑA

3.5.1 Objetivos

El apartado siguiente expone la implementación de un modelo para la identificación y caracterización de sequías en España basado en el tratamiento de imágenes procedentes de teledetección y el índice *NDDI*. Justifican el desarrollo de este modelo los trabajos ya realizados por la DGA en índices similares al *NDDI*, la sencillez operativa para el cálculo de este índice (apartado 2.5.4) y la libre distribución de productos derivados de los sensores MODIS en España. El ámbito es el nacional y el periodo temporal abarca desde febrero de 2000 hasta el último año hidrológico, 2011/12 con paso mensual. Su objetivo es la parametrización de un modelo de sequías bajo el supuesto de que el índice *NDDI* proporciona una información sobre el contenido de humedad en superficie. No parametriza ningún aspecto relacionado con el tratamiento de las reflectividades ni se tratan aspectos como la influencia del estado o de los tipos de vegetación en la reflectancia captada en determinadas bandas del espectro.

Los apartados siguientes describen la serie de operaciones realizadas desde la adquisición y georreferenciación hasta los resultados de sequías identificadas en los escasos 10 años disponibles.

3.5.2 Preprocesamiento de Imágenes

Para el cálculo del índice *NDDI* en España se ha utilizado el producto MOD13A1. Contiene el índice *NDVI* y las bandas 2 (841-876 nm) y 7 (2.105-2.155 nm) necesarias para el cálculo del *NDWI*. Estas imágenes son promedio de las imágenes captadas durante 16 días. Tienen una resolución espacial de 500 m. El formato de distribución se denomina *Hierarchical Data Format (hdf)* y permite almacenar varios juegos de datos

en un mismo archivo. El índice de sequía estimado es mensual, por lo que se usan medias de 2 imágenes cada mes, tal como se indica en la Tabla 22. Las imágenes se emiten siempre en las mismas fechas cada año durante el periodo completo 2000-2012.

Tabla 22. Elaboración del índice NDDI mensual

Fecha imagen (nº día)	Composición Imagen	Valor mensual del índice
1 17	Promedio entre 1 y 16 de enero Promedio entre 17 enero y 1 de febrero	Enero (media imagen 1 y 17)
33 49	Promedio entre 2 y 17 de febrero Promedio entre 18 de febrero y 5 de marzo	Febrero (media imagen 33 y 49)
65 81	Promedio entre 6 y 21 de marzo Promedio entre 22 marzo y 6 de abril	Marzo (media imagen 65 y 81)
97 113	Promedio entre 7 y 22 abril Promedio entre 23 abril y 8 de mayo	Abril (media imagen 97 y 113)
129 145	Promedio entre 9 y 24 mayo Promedio entre 25 de mayo y 9 de junio	Mayo (media imagen 129 y 145)
161 177	Promedio entre 10 y 25 de junio Promedio entre 26 junio y 11 de julio	Junio (media imagen 161 y 177)
193	Promedio entre 12 y 27 de julio	Julio (imagen 193)
209 225	Promedio entre 28 de julio y 12 agosto Promedio entre 13 y 28 de agosto	Agosto (media imagen 209 y 225)
241 257	Promedio entre 29 de agosto y 13 de septiembre Promedio entre 14 y 29 de septiembre	Septiembre (media imagen 241 y 257)
273 289	Promedio entre 30 de septiembre y 15 de octubre Promedio entre 16 y 31 octubre	Octubre (media imagen 273 y 289)
305 321	Promedio entre 1 y 16 de noviembre Promedio entre 17 de noviembre y 2 de diciembre	Noviembre (media imagen 305 y 321)
337 353	Promedio entre 3 y 18 de diciembre Promedio entre 19 y de diciembre y 3 de enero	Diciembre (media imagen 337 y 353)

3.5.2.1 Descarga de Imágenes

Las imágenes y productos MODIS se pueden descargar de forma manual o automática. La descarga manual puede hacerse a través de la web³¹ cuando el número de imágenes a descargar sea reducido. La selección de los productos MODIS se realiza desplegando la ventana *NASA LPDAAC Collections*³². Debe identificarse el área de trabajo en el mapa reproducido en la Figura 41.

³¹ <https://earthexplorer.usgs.gov>

³² https://lpdaac.usgs.gov/products/modis_overview

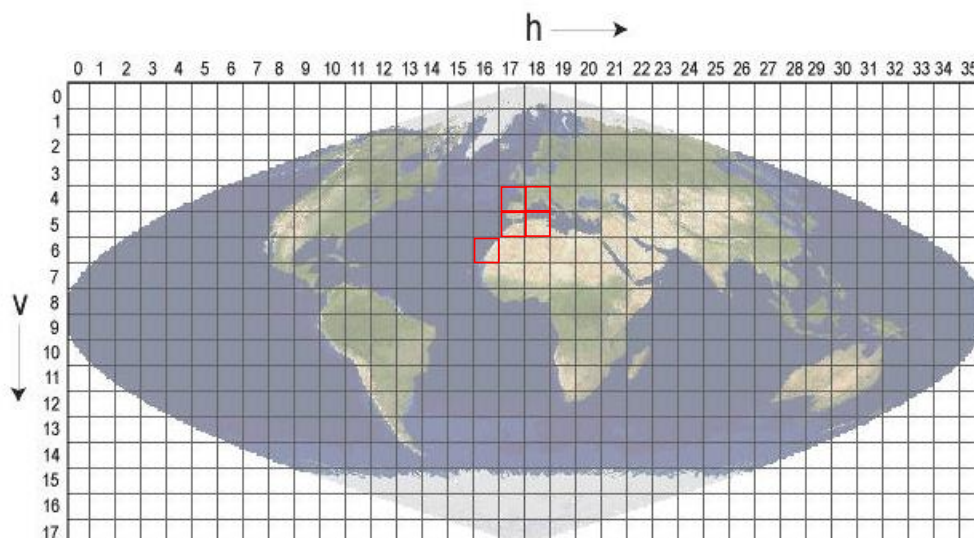


Figura 41. MODIS Sinusoidal Tiling System

Las zonas geográficas correspondientes al caso de España son un total de 5:

- h17v04, h17v05, h18v04 y h18v05 de la Península Ibérica y Baleares
- h16v06 de Canarias.

La descarga automática de los ficheros de imágenes MODIS de las 5 zonas geográficas y 2 quincenas consideradas se ha realizado a través del servidor FTP del USGS³³ (Figura 42) habiendo modificado el programa de ayuda descargado del mismo servidor. Este programa se ejecuta con el *GUI (Graphic User Interface)* de Python y se incluye en el anejo del informe.

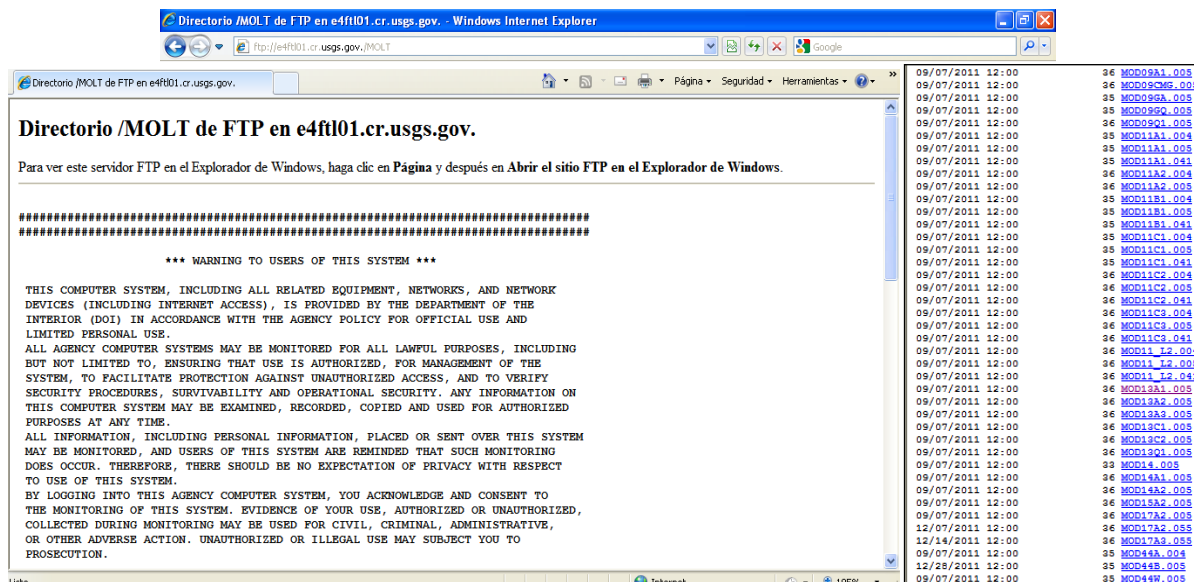


Figura 42. Servicio de FTP y productos MODIS

³³ [ftp://e4ftl01.cr.usgs.gov/MOLT](http://e4ftl01.cr.usgs.gov/MOLT)

La Figura 43 muestra el listado de ficheros *jpg*, *xml* y *hdf* que componen una escena del producto MODIS MOD13A1 en una fecha determinada. En el fichero de extensión *xml* se guarda información auxiliar y en el fichero *jpg*, una imagen de la escena.

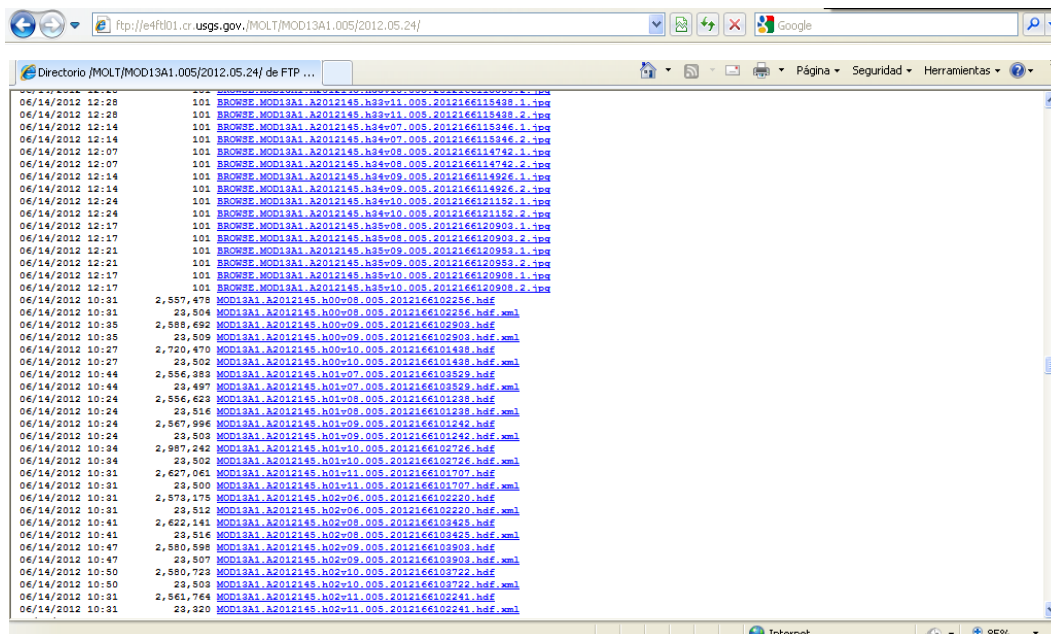


Figura 43. Formatos hdf, xml y jpg que contienen la información digital de las imágenes

3.5.2.2 Georreferenciación de MOD13A1 con ModisTool

La base de datos HIDRO del CEDEX adopta el sistema de proyección European Datum 1950. Las imágenes del producto MOD13A1 tienen una proyección sinusoidal y para llegar al mapa final en esta proyección es necesario una operación de georreferenciación previa de las imágenes MODIS. El programa utilizado se denomina *ModisTool*³⁴. Fue elaborado por la NASA para el tratamiento de las imágenes MODIS y es de libre distribución.

ModisTool permite cargar a la vez las imágenes correspondientes a la zona de trabajo (h17v04, h17v05, h18v04 y h18v05 de la Península Ibérica e Islas Baleares; h16v06 de las Islas Canarias) para una determinada fecha, realizar el mosaico de las bandas o productos seleccionados y exportarlos en unos formatos de salida determinados, con la resolución espacial y la proyección deseada (Figura 44).

³⁴ https://lpdaac.usgs.gov/tools/modis_reprojection_tool



CEDEX

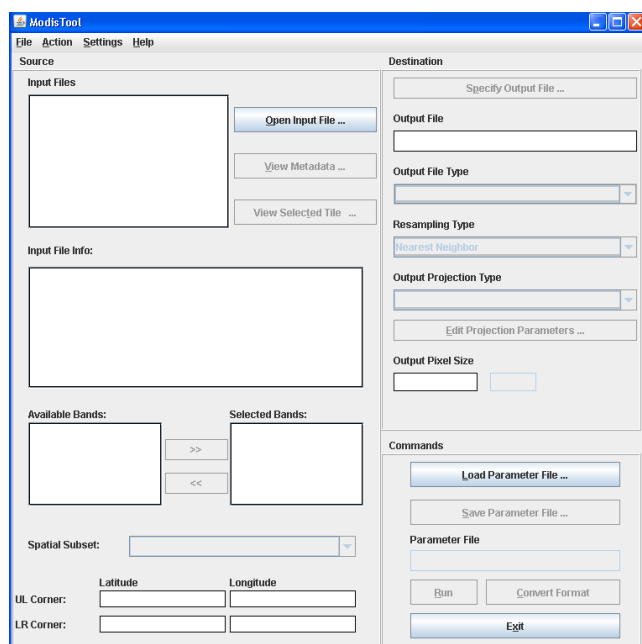


Figura 44. Software ModisTool para el procesamiento de imágenes MODIS

Los parámetros de la transformación se muestran en la Tabla 23.

Tabla 23. Datos utilizados para reproyectar las imágenes con *ModisTool*

Región	Huso UTM	Datum	Res. (m)	Coordenadas extensión zona de trabajo			
				Este	Norte	Oeste	Sur
Península Ibérica e Islas Baleares	30	WGS84	500	-67914	4869960	1140000	3859960
Islas Canarias	28	WGS84	500	186044	3257718	686044	3059518

Inicialmente, se escoge el formato *geotiff* para las imágenes exportadas. Es un formato usual para el procesamiento de imágenes y puede usarse desde cualquier tipo de software de teledetección y SIG.

3.5.2.3 Cálculo del Índice Diferencial de Sequía Normalizado o Normalized Difference Drought Index (NDDI)

3.5.2.4 NDDI

Los productos necesarios para la elaboración del índice *NDDI* (Ec. 2-78) en Península, Baleares y Canarias son el índice *NDVI* y las bandas del infrarrojo cercano y medio, ρ_{IRC} y ρ_{IROC} , para generar el índice *NDWI*. El primero ya está calculado en MOD13A1. Las imágenes tienen valores entre -2.000 y 10.000 que corresponden a valores *NDVI* entre -0,2 y 1, siendo el factor de escala de 0,0001. Los valores de reflectividad del ρ_{IRC} y ρ_{IROC} tienen el mismo factor de escala, por lo que el rango de valores en las imágenes está comprendido entre 0 y 10.000.

Siendo el paso temporal del MOD13A1 de aproximadamente la quincena, se han calculado los índices *NDDI* de cada quincena y promediado para obtener uno mensual. El cálculo se realiza en formato *geotiff* conforme a los parámetros geográficos de la

Tabla 23 en el huso 30 para el caso de la Península y Baleares y el huso 28 para Canarias (Figura 45)

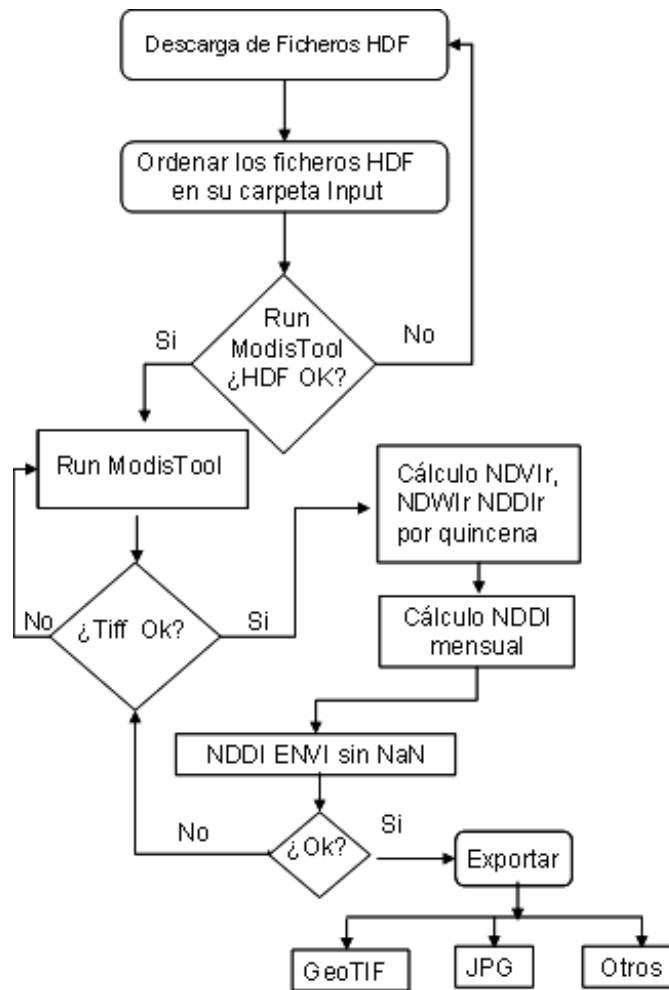


Figura 45. Diagrama de flujo del procesamiento para el cálculo del *NDDI*

La Figura 46 muestra el resultado de un mes exportado a formato *jpg* conforme a la leyenda utilizada en Gu et al. (2007). Esta leyenda presenta una gradación de colores del verde al marrón pasando por el amarillo. El carácter es más seco con mayores valores del índice y tonos hacia los marrones.

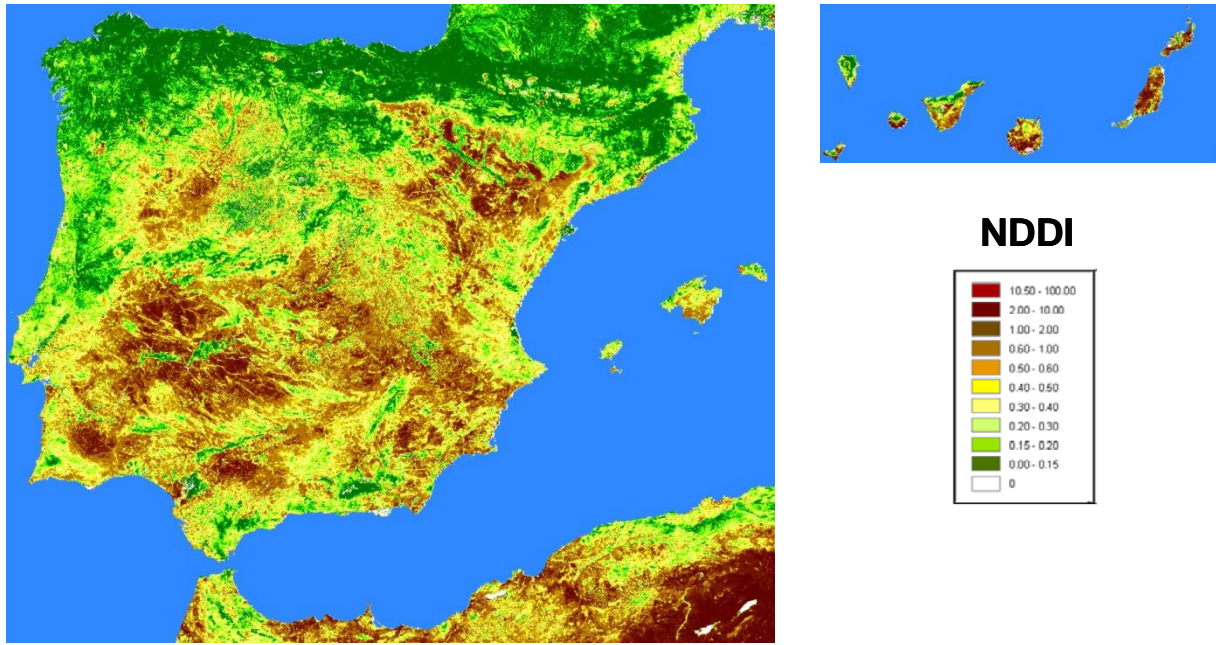


Figura 46. Índice de sequía *NDDI* para la Península Ibérica-Baleares y Canarias

Las imágenes en formato *geotiff* son incorporadas a la base de datos HIDRO mediante procesamiento en el sistema de información geográfica (SIG) ArcGIS. La Península y Baleares se proyectan en el huso 30 y las Islas Canarias, en el huso 28. Por último, se han desplazado los datos de Canarias sobre los mapas de la Península para reducir el dominio de cálculo y contemplar un único conjunto de datos de España en una sola región de trabajo. Este desplazamiento de Canarias es de *700 km* hacia el norte y de *500 km* hacia el este. Las capas raster así obtenidas se exportan en formato *ASCII* e importan al SIG-GRASS sobre el que trabaja el sistema SIMPA desarrollado en el Centro de Estudios Hidrográficos y que incorpora varias herramientas y modelos para el estudio de sequías.

En la Figura 47 se muestra el resultado del índice *NDDI* de mayo de 2012 exportado desde el SIG-GRASS. En el anejo se muestra la colección completa de mapas obtenidos entre febrero de 2000 hasta el último año hidrológico.

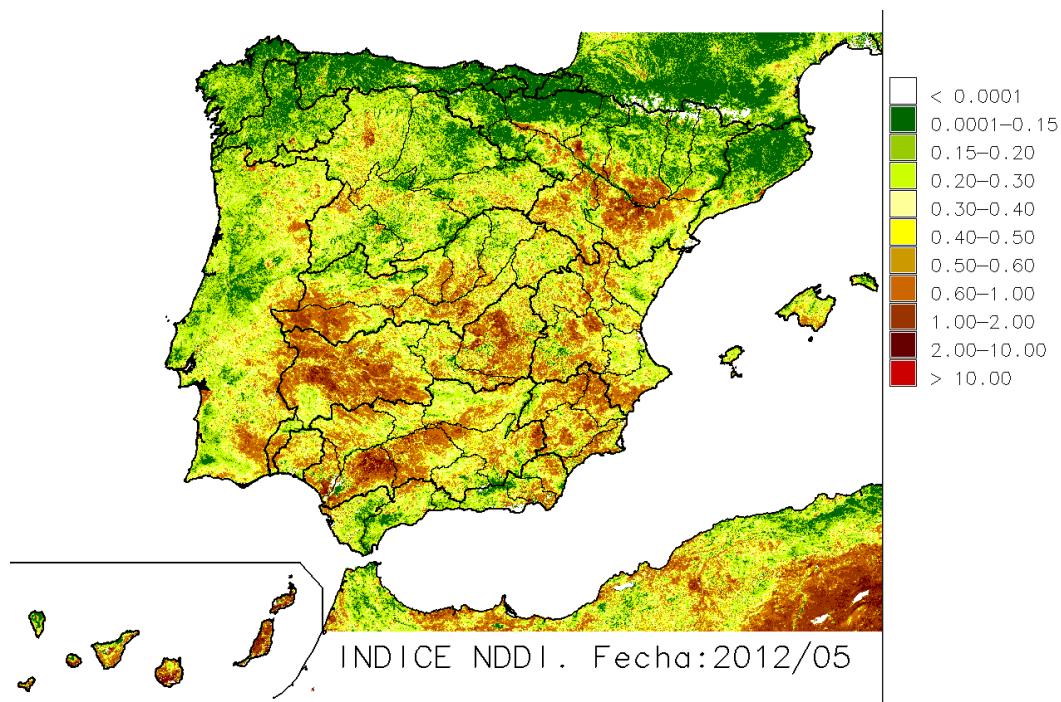


Figura 47. Índice de sequía NDDI elaborado en GRASS

3.5.3 Caracterización de Sequías

3.5.3.1 *NDDI* como Indicador de Sequía

La Figura 48 y la Figura 49 muestran dos colecciones de mapas del *NDDI*. Ambas están constituidas por los 4 mapas de los meses con que finalizan las estaciones climáticas, diciembre, marzo, junio y septiembre. La primera es de un año hidrológico, 2003/04, que pluviométricamente se normal en España (Figura 48); la segunda, de un año hidrológico seco, 2004/05 (Figura 49).



CEDEX

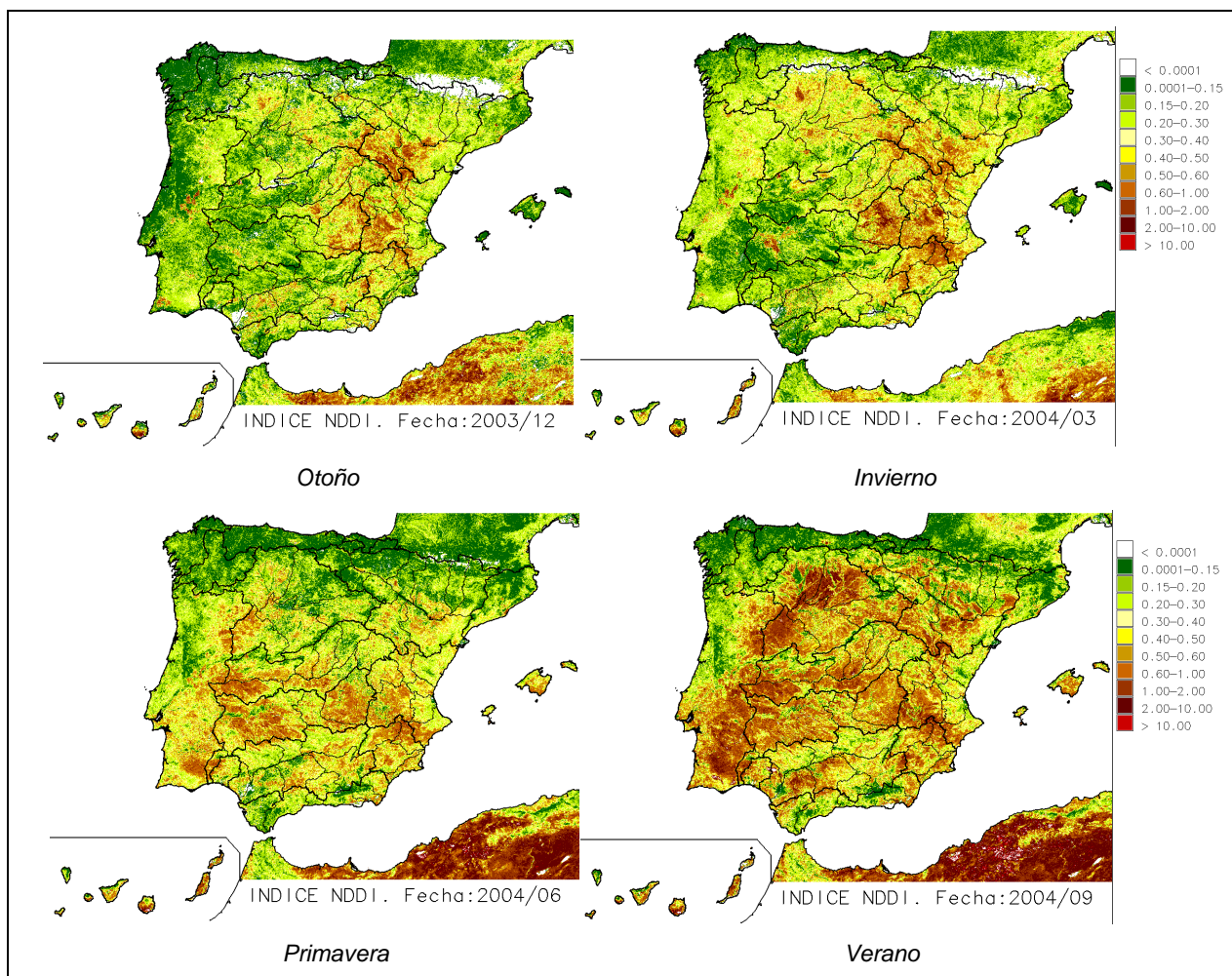


Figura 48. NDDI del año hidrológico 2003/04. Año normal

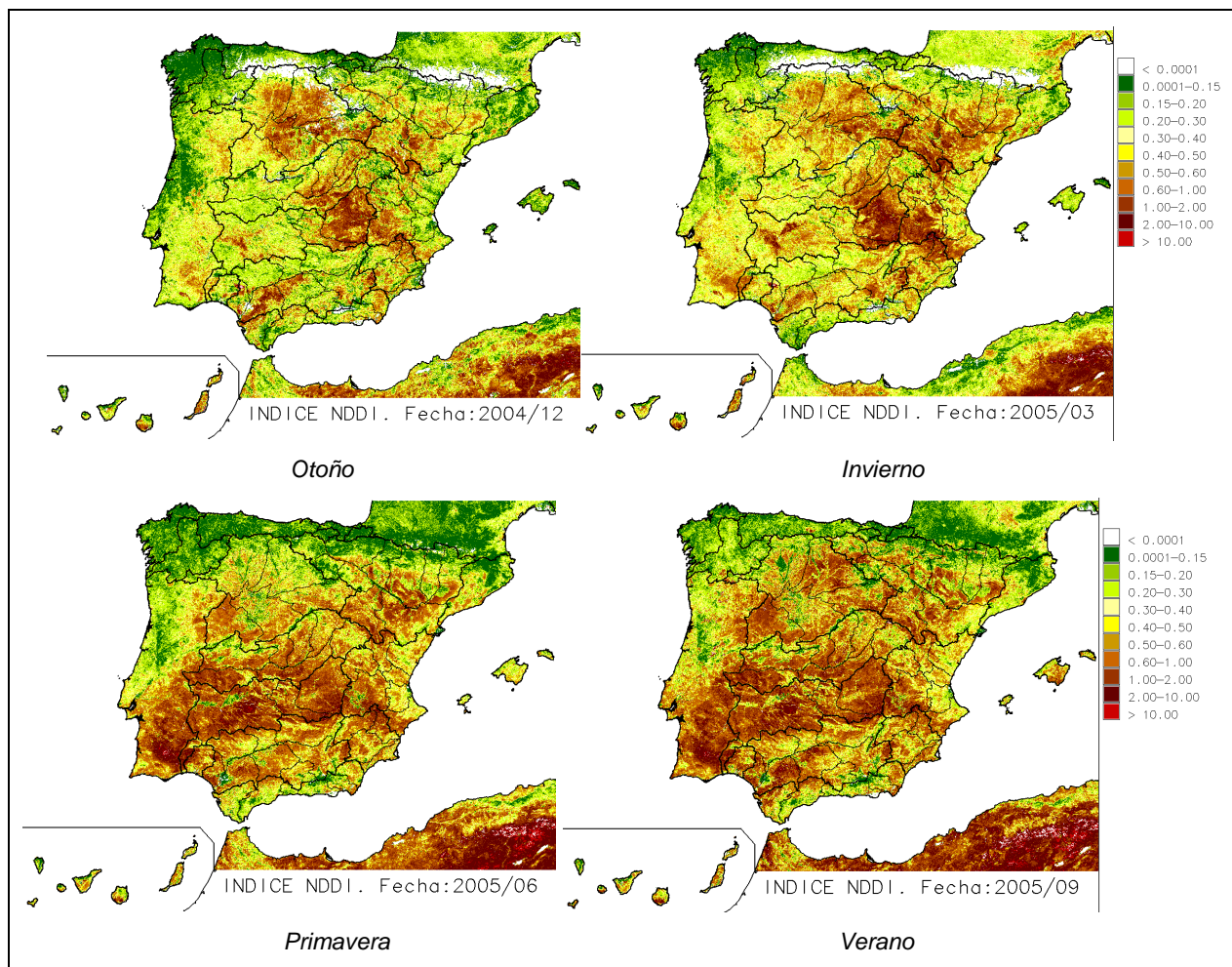


Figura 49. NDDI del año hidrológico 2004/05. Año seco

Durante el año hidrológico 2003/04 (año normal) se observa que a finales de otoño e invierno, la mitad oeste peninsular tiene valores bajos del índice siendo los más altos los de cabecera de los ríos Duero, Tajo, Gadiana y Guadalquivir, margen derecha del Ebro, Segura y Júcar. A finales de primavera los *NDDI* bajos se concentran en la parte norte peninsular y los más altos, en la mitad sur. A final del verano los valores del *NDDI* aumentan en la totalidad del territorio español a excepción del borde norte peninsular.

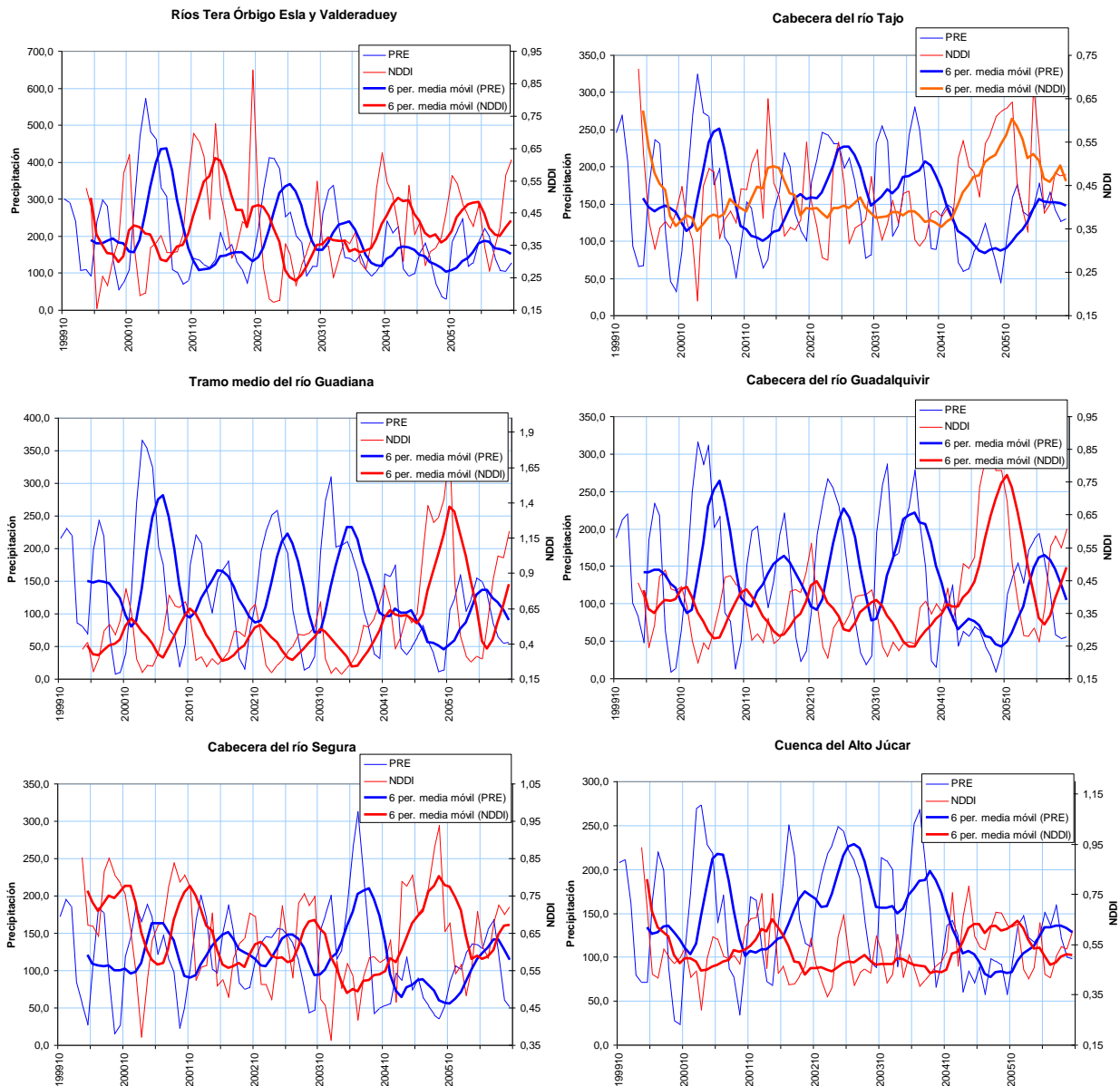
Al comparar las imágenes del año hidrológico 2004/05, considerado un año seco, con las del año anterior 2003/04, año normal, se observa un aumento importante y generalizado de los valores del índice que lo valida como herramienta para la detección de sequías.

A finales del otoño de 2004 los valores más altos del índice se extendieron a la cuenca del Duero, tramos finales de la margen izquierda del Ebro, tramos medios del Tajo y el Gadiana y tramos bajos del Guadalquivir. A finales del invierno se incrementan los valores del índice de forma generalizada aumentando la extensión de las zonas afectadas. Es en primavera cuando se aprecia con mayor nitidez el incremento de los valores del *NDDI*, resaltando las zonas más afectadas por el periodo seco: margen izquierda del Duero, la margen derecha y tramos finales de la margen izquierda del Ebro y los tramos completos de los ríos Tajo, Gadiana, Guadalquivir, Júcar y Segura.



Durante el verano los valores del índice son altos en todo el territorio español, destacando el incremento de las zonas del borde norte peninsular.

La Figura 50 muestra una comparativa de valores medios en diversas regiones SIEH del índice NDDI y de la lluvia trimestral. El paso trimestral se toma de acuerdo a representar el desfase entre la lluvia y la dinámica de la planta y del suelo. Los gráficos presentan una correlación negativa ya que a valores bajos de precipitación le corresponden valores altos del *NDDI* y al contrario, a valores altos de lluvia le corresponden los bajos del *NDDI*. Para reforzar esta conclusión se han representado sobre las anteriores las medias móviles de paso 6 en tramo grueso.



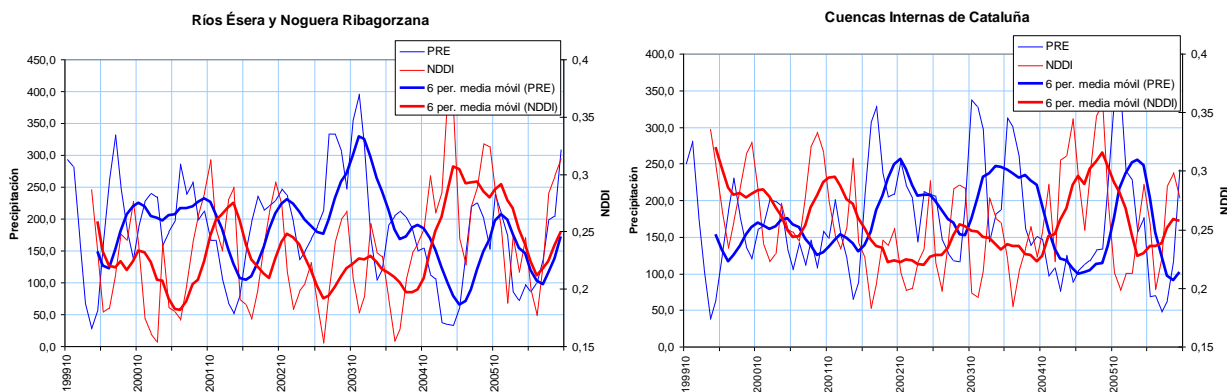


Figura 50. Contraste entre la precipitación y el índice NDDI para algunas regiones SIEH

En la figura anterior destaca el comportamiento estacional del índice *NDDI* con menores valores en las épocas húmedas y mayores en las secas. En la Figura 51 se han representado los valores medios mensuales del *NDDI* estimados durante el periodo 2000/01-2011/12 de varias regiones SIEH.

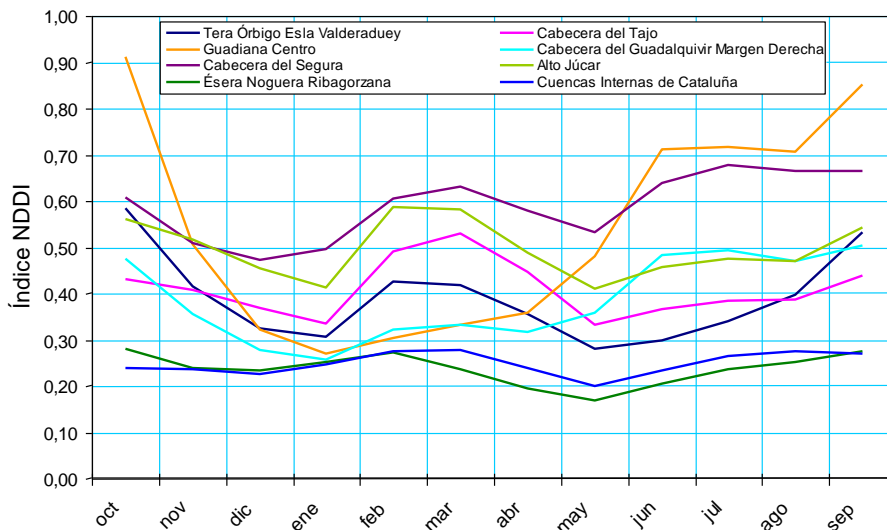


Figura 51. Valores medios mensuales del índice NDDI para algunas regiones SIEH

3.5.3.2 Desviaciones del *NDDI* como Indicador de Sequía

El marcado carácter estacional de las lluvias en España y la naturaleza árida o semiárida del sureste peninsular condicionada por la climatología dominante, que tiene a las borrascas procedentes del Atlántico como fuente principal de precipitaciones en la Península Ibérica y que determina un clima más húmedo en el norte y oeste peninsular, dificulta la identificación de las sequías. Los déficit de recurso ocurren estacionalmente por lo que la identificación de una sequía por su carácter extraordinario se facilita definiendo las anomalías respecto a los valores normales estacionales.

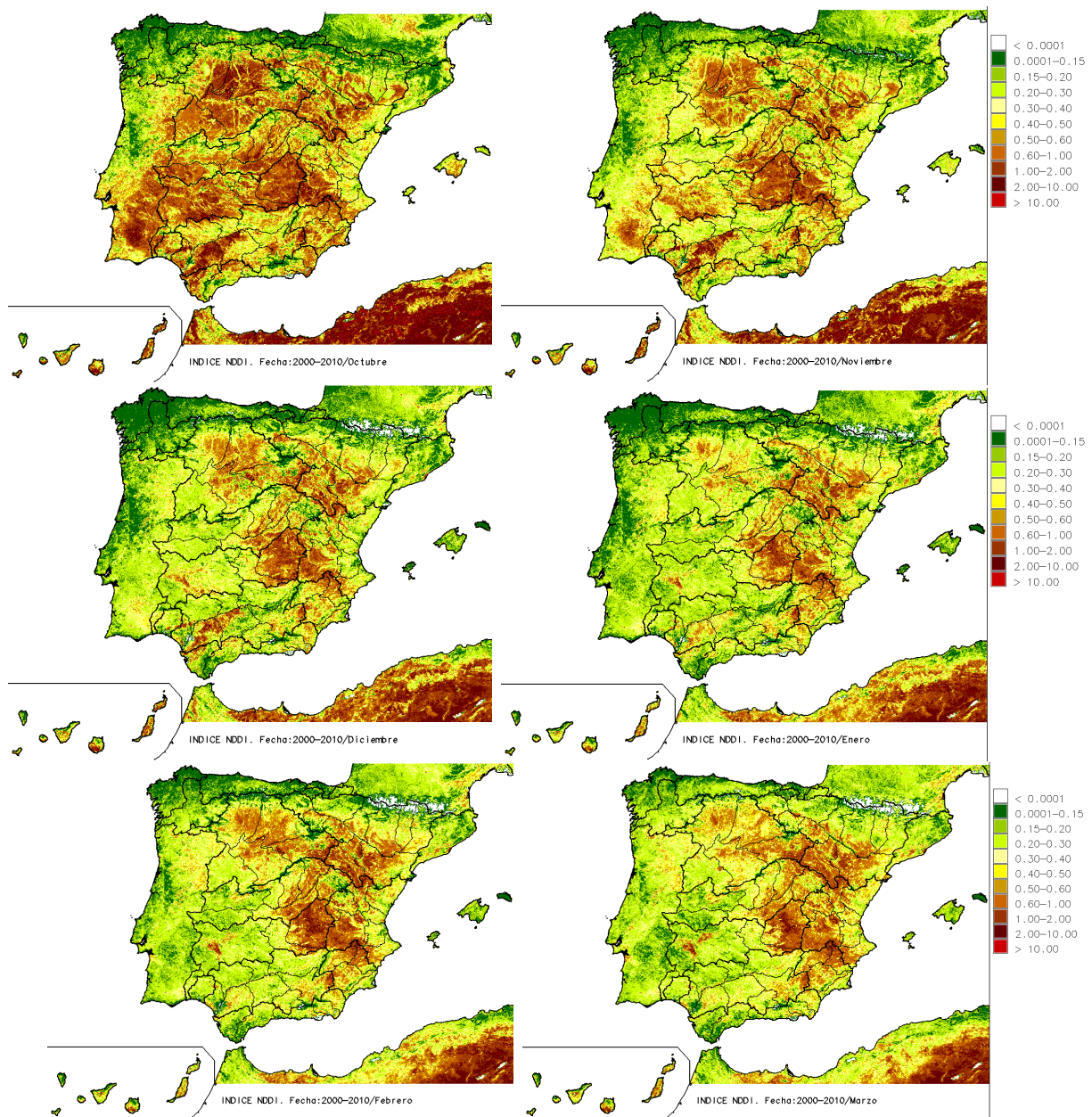
Las series disponibles de *NDDI* son relativamente cortas si se consideran cada uno de los meses por separado y el grado de autocorrelación que cabría esperar por el almacenamiento y regulación del consumo de agua. Este hecho hace conveniente proponer la estimación de anomalías respecto a un único estadístico, el valor medio, evitando la estimación de medidas de variabilidad con tan escasa información. Las anomalías se pueden estandarizar respecto al mismo valor medio. Es decir, definir las

desviaciones mensuales de los *NDDI*. Siendo *k* el orden del paso en la serie temporal completa y *j* el índice indicativo del mes, la *Desv-NDDI* de un mes es,

Ec. 3-1. Desviaciones del *NDDI*

$$DesvNDDI_k = \frac{(NDDI_k - \mu_{NDDI,j})}{\mu_{NDDI,j}}$$

Teniendo en cuenta la dependencia de los índices a factores regionales y al clima, estas desviaciones se estiman no solamente considerando la estacionalidad, sino también la variabilidad espacial. La Figura 52 muestra las 12 medias calculadas durante el periodo 2000/01-2010/11.



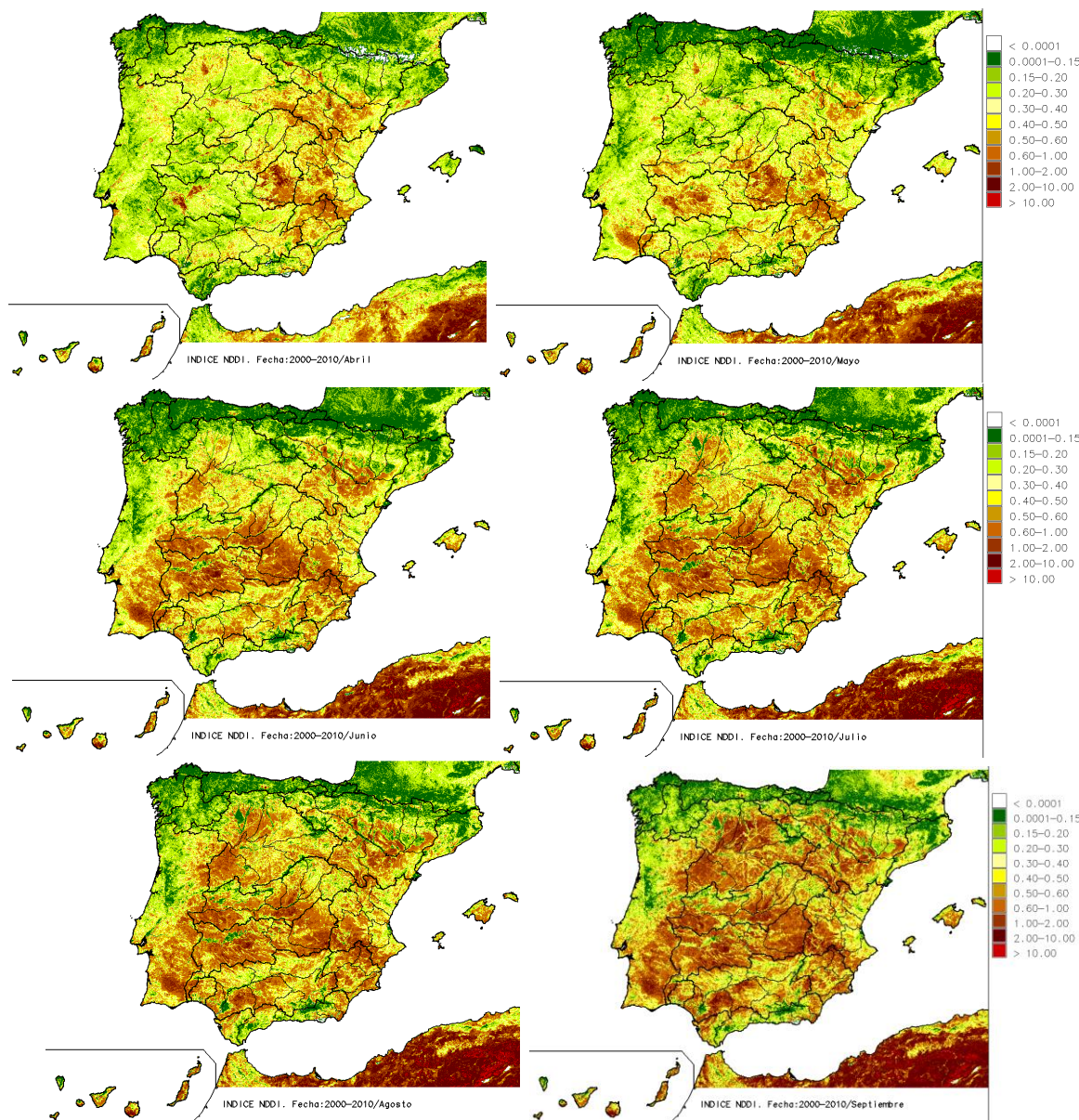


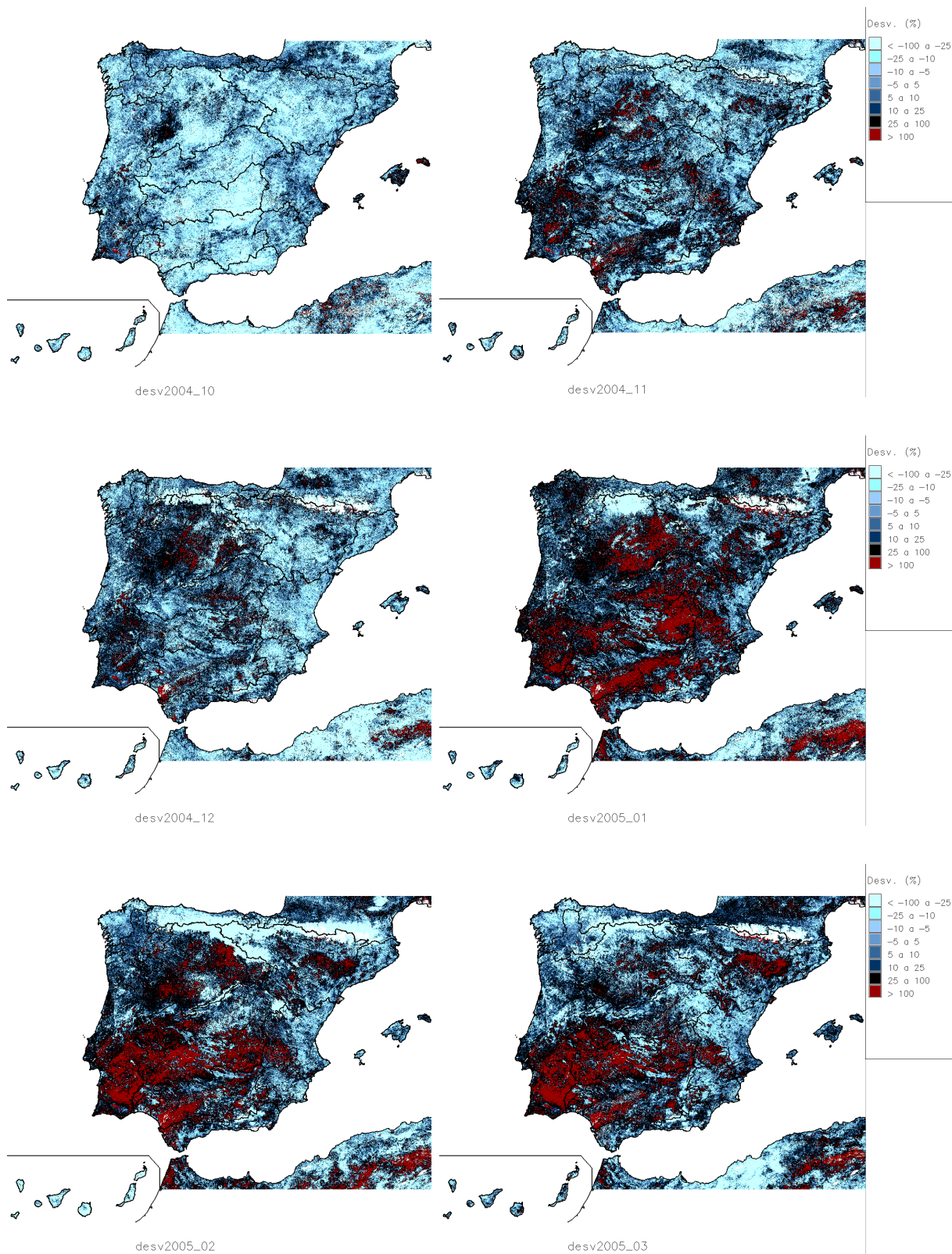
Figura 52. Mapas medios mensuales del índice NDDI para el periodo 2000-2010

Mediante la expresión Ec. 3-1 y las medias de la Figura 52 se obtiene la colección de mapas de *Desv-NDDI*. Durante el periodo 2000/01-2011/12 en España se han producido varios episodios de escasez de precipitación. Tal como se ha desarrollado en el apartado (0) se considera que un periodo de sequía comienza cuando el valor del IPE es inferior a -1 y finaliza cuando alcanza valores positivos. Hay entonces seis episodios de sequía identificados durante el periodo de estudio: 1999-2000; 2001-2002; 2004-2005; 2007-2008; 2009-2010 y 2011-2012 que ya quedaban reflejados en la Figura 17 y en la Figura 18 del apartado (3.3) desarrollado anteriormente. Si se analizan los mapas de desviación mensual del año hidrológico 2004/05 (Figura 53), que es cuando tuvo lugar la sequía más importante en el periodo estudiado, se observa el buen comportamiento del índice de *Desv-NDDI* para la identificación de las sequías.



CEDEX

Caracterización Hidrológica de Sequías



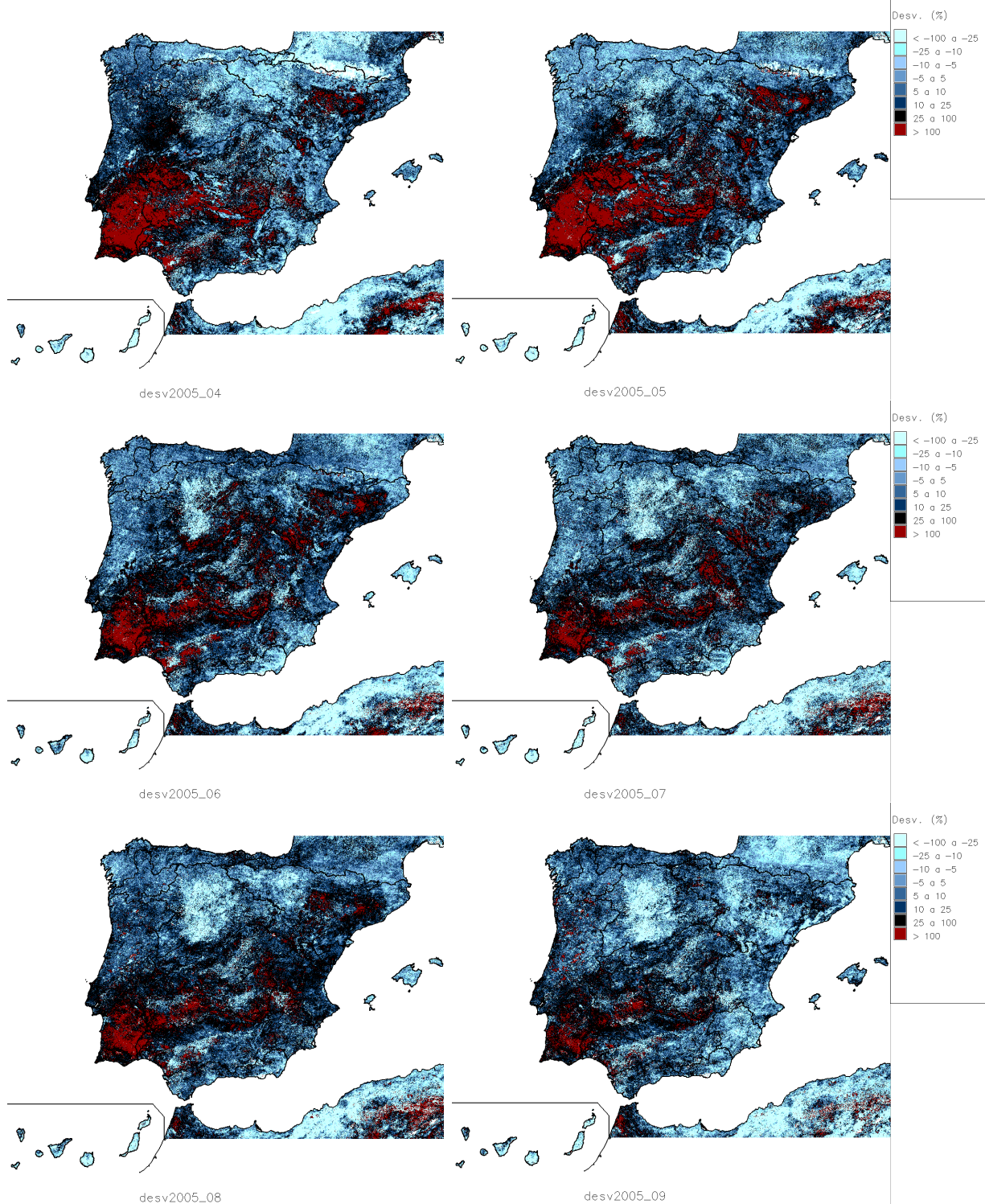


Figura 53. Mapas de desviación mensual del índice NDDI para el año hidrológico 2004/2005

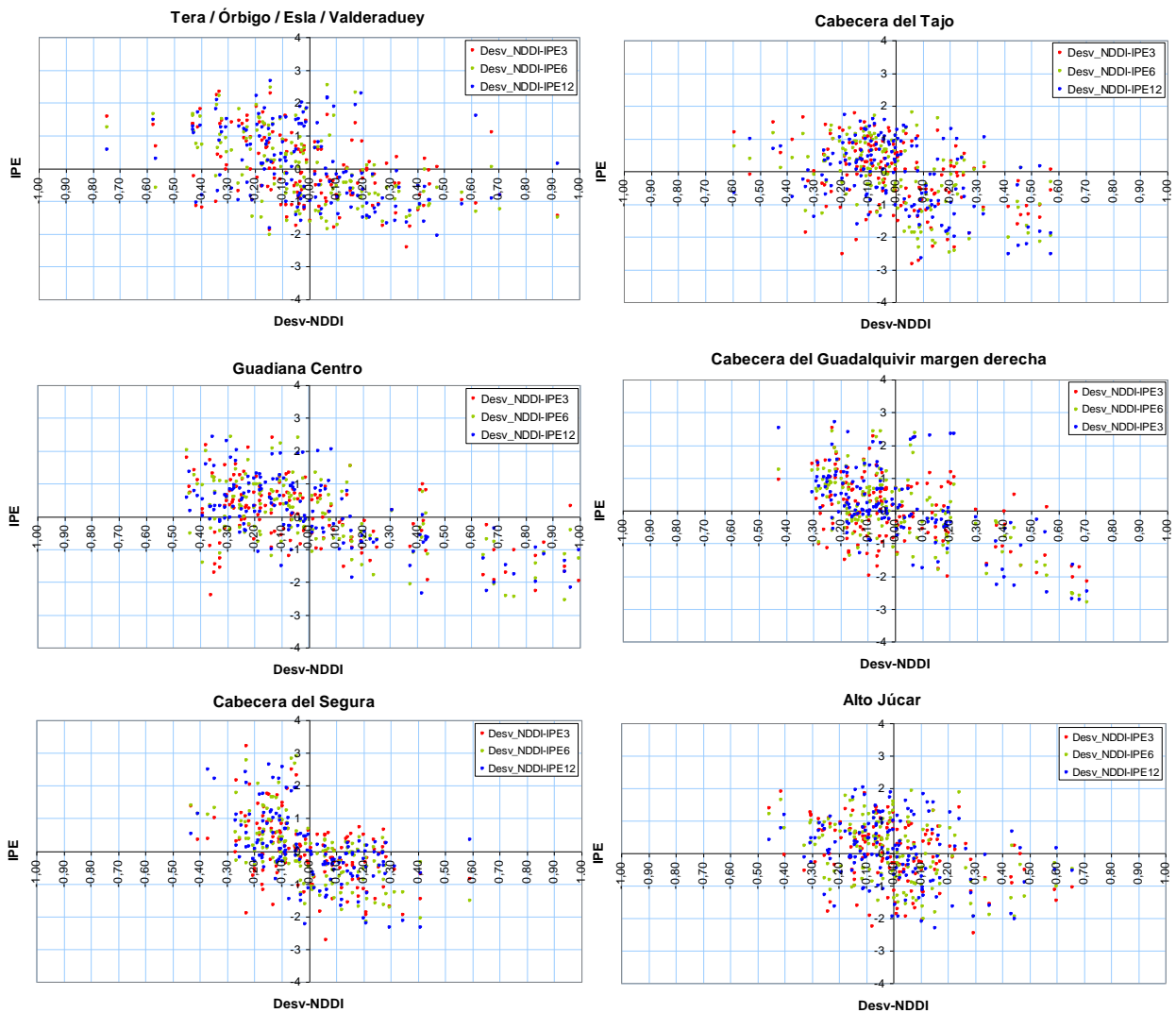
La sequía aparece en el mes de noviembre afectando al interior del Duero, Ebro y Cuencas Internas de Cataluña, tramo medio del Tajo, cabecera del Guadiana, margen izquierda del Guadalquivir y zona suroeste peninsular. Durante el mes de enero la sequía se generaliza aumentando considerablemente la extensión de las zonas afectadas: cuenca del Duero, cabeceras del Tajo, Guadiana, Júcar y Segura, margen



izquierda del Guadalquivir y el suroeste peninsular. En febrero la sequía se desplaza hacia el interior del Ebro y la vertiente atlántica y se concentra durante el final del invierno y comienzo de primavera en el suroeste peninsular y zona central del Ebro. A finales de primavera vuelve a extenderse de forma generalizada y en los meses de verano se concentra de nuevo en la zona interior del Ebro y cuencas internas de Cataluña, cabecera y margen izquierda del Guadiana y el suroeste peninsular.

3.5.3.3 Definición: Umbral de Sequía de Desv-NDDI en las regiones SIEH

La Figura 54 muestra una serie de diagramas de dispersión en los que se comparan valores medios regionales de *Desv-NDDI* y el *IPE* de varios pasos temporales, 3, 6 y 12 meses. La correlación es negativa como cabía esperar. Estos diagramas se han utilizado para estimar a qué valor de *Desv-NDDI* le corresponde el valor de *IPE* -1 que normalmente se ha usado como criterio de entrada en sequía. La colección completa de gráficas en las regiones SIEH se encuentra en el anexo de este informe.



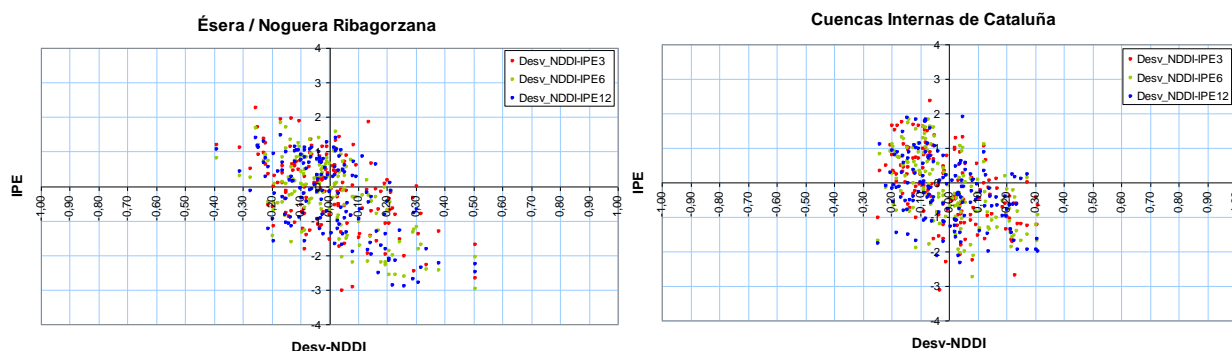


Figura 54. Diagramas de dispersión entre los índices IPE y Desv-NDDI en algunas regiones SIEH

Aparentemente y con carácter global el umbral de sequía se sitúa en torno al 20% de *Desv-NDDI*, si bien regionalmente puede variar en torno a valores como el 10-15% en el norte peninsular, Cantábrico, Miño-Sil, cuencas internas de Galicia Costa y País Vasco, a otros en el entorno del 25-40% estimado en zonas de la vertiente atlántica, Duero, Tajo, Guadiana y Guadalquivir, hasta otros del 20% en el SE mediterráneo, Segura y Júcar y en torno al 10-20% en el NE mediterráneo, cuencas internas de Cataluña y Ebro. Es decir, aparece un comportamiento regional que tiende a diferenciar el territorio Mediterráneo del Atlántico y las zonas de costa del interior. Este carácter regional se ha representado en la Figura 55. En la Tabla 24 se muestran los umbrales de sequía para cada región SIEH.

Tabla 24. Datos de umbral de sequía para las regiones SIEH a partir de IPE -1

Regiones SIEH	Desv-NDDI (%)	Regiones SIEH	Desv-NDDI (%)
Miño-Sil	15	Cuencas Internas Andalucía. Sistema I	20
Cantábrico	15	Cuencas Internas Andalucía. Sistema II	20
Cantábrico (Norte III)	15	Cuencas Internas Andalucía. Sistema III	15
C.I. País Vasco	10	Cuencas Internas Andalucía. Sistema IV	20
C.I. Galicia Costa	10	Cuencas Internas Andalucía. Sistema V	20
Duero. Tera-Órbigo-Esla-Valderaduey	25	Cuencas Internas Andalucía. Tinto-Piedras-Odiel	30
Duero. Carrión-Pisuerga-Arlanza	35	Cuencas Internas Andalucía. Guadalete-Barbate	35
Duero. Alto Duero-Riaza	25	Segura. Cabecera	20
Duero. Adaja-Cega-Bajo Duero	30	Segura. Margen izquierda	20
Duero. Tormes-Águeda	30	Segura. Margen derecha	20
Tajo. Cabecera	25	Segura. Litoral	20
Tajo. Henares-Tajuña	25	Júcar Norte	15
Tajo. Jarama-Guadarrama	25	Júcar. Alto Turia	20
Tajo. Alberche	25	Júcar. Bajo Turia	20
Tajo Medio margen izquierda	25	Alto Júcar	25
Bajo Tajo margen derecha	30	Júcar Medio	25
Bajo Tajo margen izquierda	35	Bajo Júcar	20
Guadiana. Cuenca Alta	30	Júcar Sur	20
Guadiana. Jabalón-Bullaque	35	Ebro. Cabecera	20
Guadiana. Centro	40	Ebro. Tirón-Najerilla-Iregua	20
Guadiana II	30	Ebro. Batas-Zadorra-Inglares-Irati-Arga-Ega	20
Guadalquivir. Cabecera margen derecha	25	Ebro. Margen derecha desde el Leza hasta el Huecha	20
Guadalquivir. Guadiana Menor	20	Ebro. Aragón-Arbas	20
Guadalquivir Medio margen izquierda	25	Ebro. Jalón-Jiloca	20

Regiones SIEH	Desv-NDDI (%)	Regiones SIEH	Desv-NDDI (%)
Guadalquivir Medio margen derecha	25	Ebro. Gállego-Cinca	20
Bajo Guadalquivir margen izquierda	30	Ebro. Ésera-Noguera Ribagorzana	15
Bajo Guadalquivir margen derecha	30	Ebro. Segre	15
Guadalquivir. Almonte-Marismas	35	Ebro. Huerva-Aguas Vivas-Martín-Guadalupe-Matarraña	15
Guadalquivir. Alto Genil	20	Cuencas Internas Cataluña	10
Islas Baleares	30	Islas Canarias	30

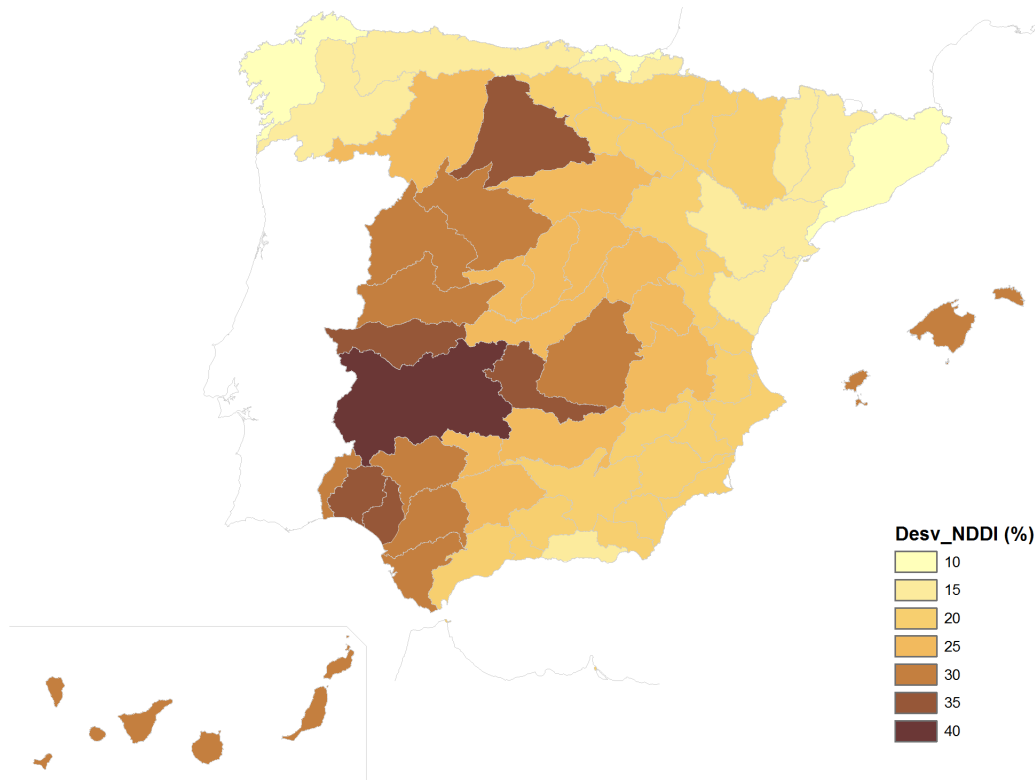


Figura 55. Umbral de sequía de Desv-NDDI para las regiones SIEH

3.5.3.4 Sequías Identificadas

Una vez definido un criterio de entrada en sequía en *Desv-NDDI* se pasa a identificar las ocurridas en cada una de las regiones del SIEH para la serie de imágenes disponible. Cada celda del modelo entra en sequía cuando se supera este valor umbral de *Desv-NDDI*. El final de la sequía en cada celda se da cuando se tenga una desviación negativa, es decir, cuando el valor del índice *NDDI* sea superior al medio mensual de esa celda. Una vez que las sequías en cada celda han sido definidas, la sequía regional aparece cuando se supera un segundo umbral equivalente al área en sequía mínima. El umbral de área mínima variaría de una región a otra. Es razonable considerar porcentajes de área en sequía menores en las regiones de mayor área. En el presente trabajo se han considerado porcentajes entre el 30% (regiones de mayor área) y 50% (regiones de menor área) después de analizar las sequías identificadas y compararlas con las estimadas con otras metodologías. La duración mínima de sequía se mantiene como en apartados anteriores en 3 meses, es decir, una estación climática en España.

La Figura 56 muestra la evolución del área seca en España siguiendo el modelo descrito. Recorre el periodo temporal comprendido entre los años hidrológicos 2000/01 y 2010/11. Las sequías se destacan con color rojo. De esta manera se han identificado varias sequías. La más importante por área seca ocurre en el año hidrológico 2004/05; se extendería durante el año 2005/06 conforme a un criterio menos restrictivo que el del 30% utilizado (MAGRAMA, 2008; Ferrer en Sivakumar et. al., 2011; Real Decreto 1265/2005). De la misma manera se podrían haber identificado como sequías los periodos de corta duración entre los años 2000/01 y 2001/02, en el 2007/08 y en el 2008/09.

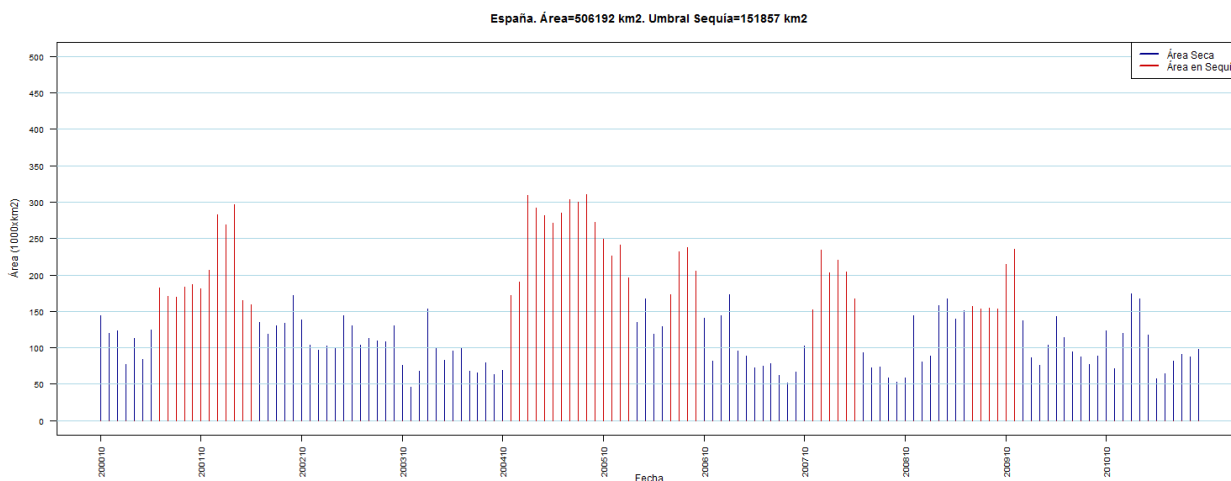


Figura 56. Sequías Desv-NDDI en España

A continuación se muestran rachas de sequía identificadas en algunas regiones de España. En el anejo al informe se incluye la colección completa en las regiones del SIEH.

La Figura 57 muestra las rachas de sequías identificadas en la región SIEH de las cuencas del Tera, Órbigo, Esla y Valderaduey de la cuenca del Duero; la Figura 58, las de cabecera del Tajo; la Figura 59, las de afluentes por margen derecha del bajo Guadalquivir; la Figura 60 las de cabecera del Segura; la Figura 61 se refiere a la cabecera del Ebro y la Figura 62 a las de Cuencas Internas de Cataluña. Todas ellas señalan 3 sequías importantes cuya fecha de ocurrencia varía entre las regiones. La intensidad de la sequía del año 2001/02 parece haber sido mayor en la mitad norte de la Península. Es generalizada en toda España la del 2004/05 e intensa la del 2006/07 al 2007/08 en el noreste peninsular.



CEDEX

Caracterización Hidrológica de Sequías

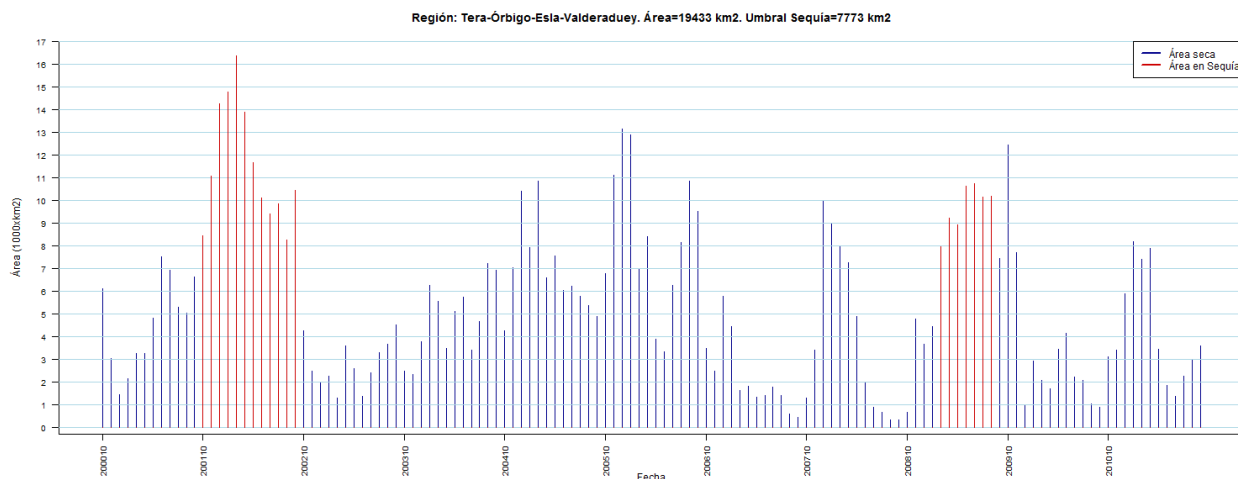


Figura 57. Sequías Desv-NDDI en la Región Tera, Órbigo, Esla y Valderaduey en el Duero

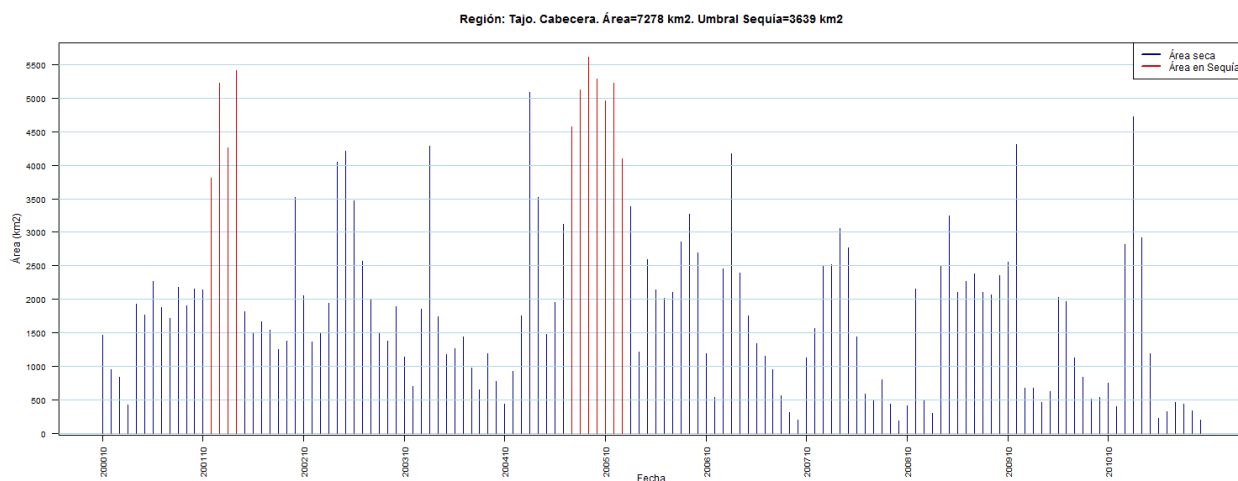


Figura 58. Sequías Desv-NDDI en la cabecera del Tajo

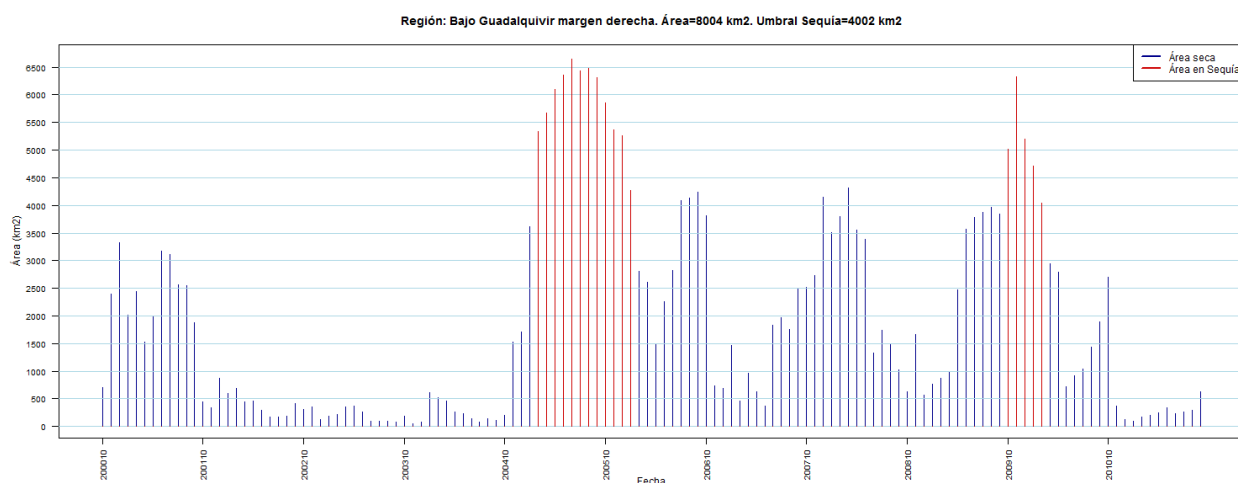


Figura 59. Sequías Desv-NDDI en cuencas de margen derecha en el bajo Guadalquivir

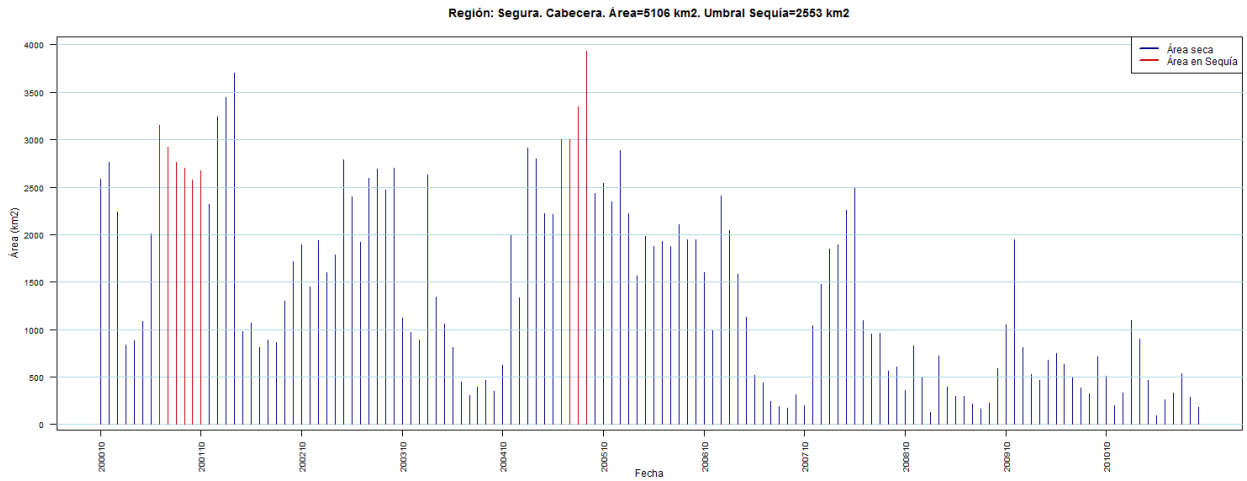


Figura 60. Sequías Desv-NDDI en la cabecera del Segura

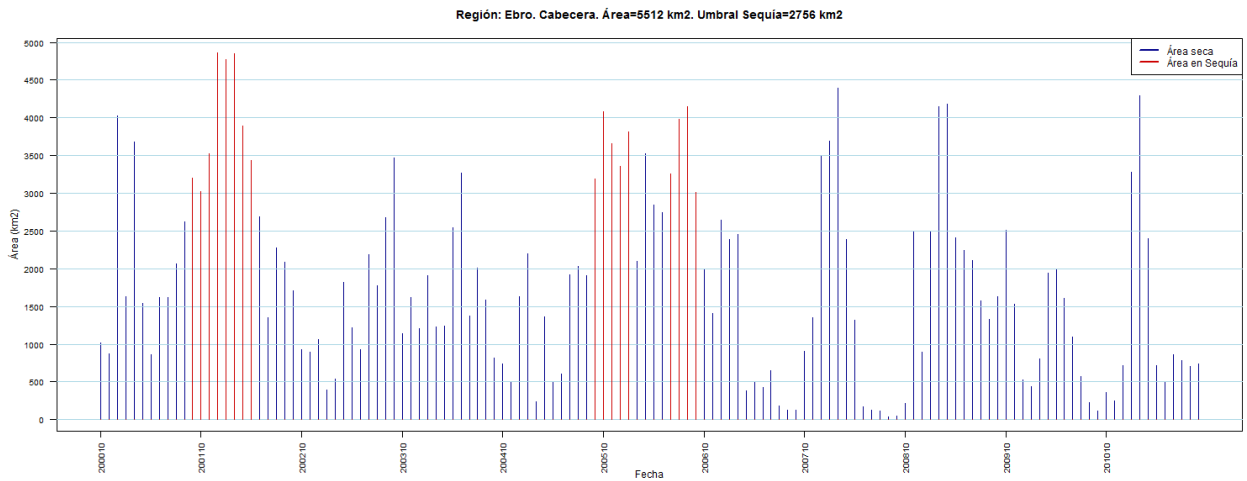


Figura 61. Sequías Desv-NDDI en la cabecera del Ebro

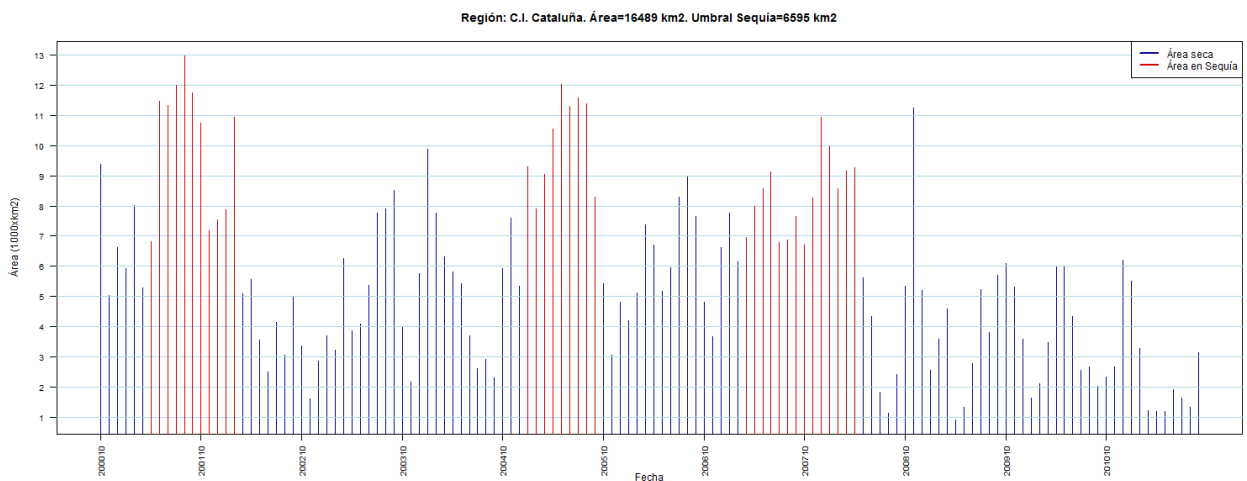


Figura 62. Sequías Desv-NDDI en Cuencas Internas de Cataluña



3.5.4 Conclusiones Parciales

La teledetección constituye una herramienta útil en el estudio de las sequías por ser capaz de evaluar el contenido de agua en el territorio utilizando diferentes tipos de índice. El índice normalizado de vegetación y el *NDDI* propuesto por el NDMC son particularmente útiles en el estudio de sequías. La propia DGA ha desarrollado índices alternativos para ser utilizados en España con las imágenes disponibles en su momento. Actualmente esta información es de libre acceso a través de los servidores de la NASA por lo que se ha considerado oportuno formular un modelo de identificación de sequías en España basado en el índice *NDDI*.

En su implementación es necesario distinguir una fase de preproceso y adquisición de las imágenes conforme a los criterios geográficos de la base de datos HIDRO del Centro de Estudios Hidrográficos. Para ello se han adaptado programas de descarga automática desarrollados por la NASA, se han georreferenciado las imágenes mediante el programa ModisTool y se han utilizado los sistemas de información geográfica ArcGIS y GRASS para el análisis de las sequías.

El índice *NDDI* calculado en el presente informe utiliza imágenes de bandas captadas por los sensores del MODIS y distribuidas en el producto MODIS13A. Cada imagen MODIS se compone de 5 escenas que cubren la totalidad del territorio español. Están disponibles desde febrero de 2000, lo que supone casi 11 años de imágenes mensuales hasta la actualidad. El índice *NDDI* tiene un comportamiento estacional con menores valores en las épocas húmedas y mayores en las secas, como puede apreciarse en la Figura 51. Este número podría considerarse escaso para el cálculo de estadísticos como las medias mensuales y las desviaciones típicas mensuales. Dadas estas condiciones, se ha propuesto el uso de desviaciones del *NDDI* únicamente respecto a la media mensual. Una desviación positiva es indicativa de una situación seca, mientras que una negativa, de una húmeda.

El análisis de las sequías mediante teledetección tiene la ventaja de que permite captar directamente información sobre el estado vegetativo de la planta y, por extensión, del contenido de humedad en el suelo de un territorio al completo, contemplando la variabilidad espacial de la variable captada. El manejo de otros índices para el estudio de sequías basados en registros hidrometeorológicos necesita de la elaboración de hipótesis de interpolación de la lluvia, del establecimiento de relaciones de la lluvia con otras variables hidrológicas o de la calibración de parámetros relacionados con leyes de transferencia de agua, tal como ocurre con el índice de precipitación estandarizada (*IPE*) o el de Palmer (*PDSI*).

El modelo propuesto de identificación de sequías contempla dos pasos. Primeramente, se identifica el estado de sequía en cada celda del territorio mediante un umbral en *Desv-NDDI* (%). Para ello se analizaron las relaciones regionales entre el índice *IPE* y la *Desv-NDDI*. El ajuste de este umbral es regional ya que se entiende que las componentes regionales no han sido filtradas completamente del índice *Desv-NDDI*.

Seguidamente, se puede contabilizar mensualmente el número de celdas o área seca, de lo que se puede inferir cuándo ha ocurrido una sequía regional si se fija un segundo parámetro, umbral de área en sequía. Los resultados se ajustan al conocimiento actual de sequías ocurridas durante el último decenio.

Aparte de la principal ventaja que ofrece el manejo de las imágenes de la teledetección, ya subrayada en los párrafos precedentes, podrían destacarse dos aspectos de este trabajo. Adapta la información captada de sensores remotos de un territorio a un modelo de rachas para la identificación de sequías. Por otro lado, si conceptualmente las imágenes de teledetección ofrecen información sobre el estado de humedad en la vegetación y suelo, este índice aporta información sobre aspectos relacionados con la generación de escorrentía y, por tanto, de las etapas iniciales en el desarrollo de una sequía, siendo de utilidad en los sistemas de prevención y mitigación de sequías.

Finalmente, un argumento en contra de la propuesta presentada residiría en la necesidad de corrección de las reflectividades captadas en territorios donde la mezcla entre el suelo, la vegetación y los tipos y estado de la última con curvas de reflectividad esencialmente distintas (Figura 63) resulte problemática para que el índice *NDDI* sea representativo.

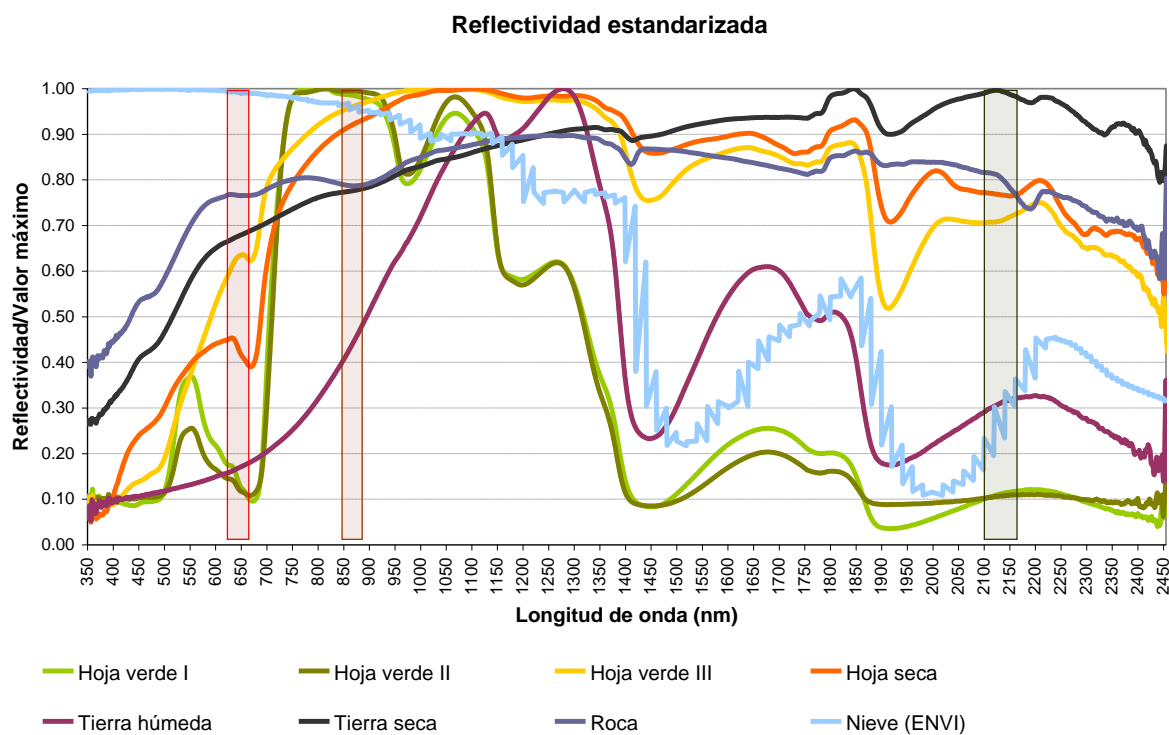


Figura 63. Curvas de reflectividad

Otro tema se refiere a la caracterización de fenómeno extremo por medio de desviaciones en una serie temporal todavía corta. Una posible propuesta de trabajos a futuro consistiría en el desarrollo de metodologías para ampliar las series de *NDDI*.

4 RESUMEN Y CONCLUSIONES

El presente informe describe los trabajos realizados para la caracterización de sequías en España utilizando una serie de índices de carácter hidrológico. Una primera parte del informe se ha destinado a exponer los fundamentos de un amplio conjunto de estos índices para, a continuación, emplear una selección de éstos al estudio de sequías en regiones de España. Las regiones utilizadas son las definidas en el Sistema de Indicadores del Estado Hidrológico, SIEH, y fueron propuestas por la Dirección General del Agua, DGA, para representar con cierta aproximación unidades de generación de recurso y uso del agua. Tal como ya se ha tratado en el informe sobre los sistemas de indicadores y el SIEH, el diseño de la infraestructura hidráulica y la gestión del recurso hídrico no se ajustan completamente a la regionalización propuesta, pero ésta se ha considerado suficiente para estudiar las sequías con carácter global en España.

Se han distinguido dos grandes grupos de índices de sequía. Por un lado, los que utilizan las imágenes captadas por teledetección en diferentes bandas del espectro electromagnético. La principal ventaja de estos índices reside en estar basados en el uso de series imágenes captadas con técnicas homogéneas que abarcarían completamente el territorio nacional. Los índices de sequía y las operaciones realizadas con las imágenes tienen un fundamento físico fácilmente comprensible. Sin embargo, las series son cortas y los índices derivados son producto de una mezcla de reflectancias de vegetación y suelo, con el consiguiente problema de interpretación de resultados.

Un segundo gran grupo de índices se extrae del manejo de variables hidrometeorológicas. Pueden tener una elaboración más compleja y sofisticada y abarcan cualquier fase del ciclo hidrológico, desde la lluvia a la escorrentía pasando por la humedad del suelo o el almacenamiento en embalses. La longitud de las series de registros hidrometeorológicos es superior en orden de magnitud a la de los basados en sensores remotos.

Se ha seleccionado un reducido grupo de índices para aplicarlos en las regiones SIEH de España a varias variables hidrológicas. Son los modelos de rachas a variables hidrológicas simuladas, el índice de precipitación estandarizado, la asignación de periodos de retorno y el índice NDDI.

Los modelos de rachas de sequía mantienen un sentido físico y claro con las variables de trabajo. Los parámetros de los que depende la identificación de sequías son el umbral de inicio de sequía, la referencia respecto a la que estimar el déficit y el parámetro de recuperación. De acuerdo a mejorar la comparabilidad con otros modelos, se han considerado umbrales de inicio equivalentes al percentil mensual del 85%, las medianas mensuales como referencia de cálculo de los déficit y parámetros de recuperación del 10%.

Las sequías así parametrizadas en las series de lluvia y escorrentía estimadas entre los años hidrológicos 1930/31 y 2010/11 procedentes de la simulación SIMPA-CEH08 no muestran claramente que el factor clave de la propagación de las sequías sea la capacidad de regulación natural de los acuíferos. Es decir, cabría esperar que debido a esta capacidad de regulación de los acuíferos, el número y el déficit de sequías en escorrentías fuera menor que el de las de lluvia. No ocurre esto y el mecanismo se



hace más complejo y dependiente de aspectos como la estacionalidad de las lluvias, la relación entre la intensidad de lluvia y ETP, la torrencialidad de la lluvia y el reparto entre escorrentía superficial y subterránea, las condiciones iniciales de los acuíferos y la influencia de una tendencia plurianual. Esto amplía las causas que condicionan la aparición de una sequía hidrológica y destaca la necesidad de mantener modelos hidrológicos capaces de integrar los factores anteriores y de estimar la respuesta del sistema hidrológico al déficit de lluvias.

En el caso concreto de España, existe una tendencia decreciente significativa en las series de precipitación y escorrentía lo que se traduce en la aparición de la mayoría de rachas secas a partir de la mitad de los años 70 hasta el final de la serie. El conjunto de eventos de sequía identificados en series de casi 80 años resulta escaso si se pretende caracterizar las frecuencias de ocurrencia si se consideran al menos las 2 variables aleatorias que determinan cada evento seco, la duración y el déficit.

La generación de series sintéticas de lluvia y escorrentía es una alternativa para reproducir series estadísticamente similares a las mensuales originales de lluvia y escorrentía. Estas series sintéticas permitirían identificar un número suficiente de eventos secos con suficientes combinaciones entre duración y déficit y caracterizar regionalmente las sequías cuya representación se puede realizar mediante curvas de Duración-Déficit-Frecuencia, *DDF*. La distribución bivariada se simplifica en la combinación de 2 distribuciones de frecuencias de las variables aleatorias déficit y duración. La distribución gamma de dos parámetros representa el déficit, mientras que la distribución geométrica, la duración.

Caracterizada la frecuencia regional, a cada sequía identificada durante el periodo de estudio comprendido entre 1930/31 y 2010/11 se le asigna una frecuencia o un periodo de retorno en función de su duración y déficit. Simplificadamente y a diferencia del modelo anterior las sequías se han identificado en términos anuales. Es decir, son periodos de años con precipitación o escorrentía anual continuamente inferiores a la mediana de la serie con umbrales de inicio y recuperación en la mediana. Las probabilidades de año seco o húmedo son por tanto del 50%.

Con los resultados alcanzados con lluvias y escorrentías vuelven a surgir diferencias que cabría ligar a factores como los mencionados al tratar el modelo de rachas. Sin embargo, la mayor ventaja del procedimiento propuesto es que permite caracterizar las sequías bajo una hipótesis de estacionariedad climática. Y establecer una relación de orden entre distintos eventos de sequía, fijando una referencia para el análisis y planificación hidrológica. Así, los resultados alcanzados en España destacan la importancia de la sequía de la primera mitad de los años 90 tanto en precipitaciones como en escorrentías, así como el carácter intenso pero regional de las sequías de mediados de la primera decena de años del siglo XXI. También se ha destacado la posibilidad del uso combinado de las estimaciones de los periodos de retorno en variables como la lluvia y escorrentía para determinar cómo evoluciona una sequía o establecer medidas de previsión en sistemas de indicadores.

El criterio del periodo de retorno se puede incorporar a los sistemas de indicadores de sequías al permitir evaluar la peligrosidad de una sequía en curso y definir niveles de prealerta, alerta y emergencia. La caracterización en términos de curvas *DDF*, presenta la posibilidad de estudiar cambios en la ocurrencia de sequías si están disponibles

otros escenarios climáticos, tal como ocurre en los estudios de impacto del cambio climático.

El índice *IPE* se ha recomendado para el estudio de sequías por la disponibilidad prácticamente generalizada de la variable precipitación. Sin embargo, el segundo fundamento del modelo que se basa en la representación de otras variables hidrológicas en función del paso de agregación de las lluvias no se suele concretar. Es decir, teóricamente se considera que un orden de agregación mensual representaría la dinámica de la lluvia y de la escorrentía directa; uno estacional, es decir, de unos 3 meses, sería predictivo de la dinámica del agua en el suelo, mientras que uno semestral o superior lo sería de una componente subterránea y, en función del peso de esta componente, de la aportación total.

En el presente informe se ha estimado un orden de agregación para representar las escorrentías y completar la implementación del modelo *IPE*. Se ha comprobado entonces el grado de correlación entre lluvias agregadas y escorrentías para en función del valor máximo de R^2 seleccionar el paso óptimo. En cuencas y estaciones climáticas húmedas predominan como pasos óptimos de agregación de 1 mes, mientras que en cuencas y épocas secas son predominantes los pasos de 3 y 6 meses. Es decir, se encuentra que existen dos patrones de variación, el regional y el estacional, cuya causa se puede encontrar en el peso relativo de la componente subterránea respecto a la total, en función de las características hidrodinámicas de las masas de agua subterráneas.

En conclusión, si se utiliza el índice *IPE* para el estudio de las sequías en escorrentía, se sugiere la incorporación de parámetros regionales y estacionales que representen esta dependencia. Por ello, se han generado dos conjuntos de mapas *IPE* mensuales. El primero representaría la frecuencia de lluvias y permitiría el estudio de sequías meteorológicas. El segundo, la escorrentía, pero en función del paso temporal de agregación de 1, 3 y 6 meses que mejor la represente y, por tanto distinto en función de la región y la estación climática del año. Conviene resaltar que estas conclusiones se basan en relaciones con bajos coeficientes R^2 y que vienen a subrayar la no linealidad de los procesos hidrológicos y las dificultades del índice *IPE* para representar otras variables hidrológicas distintas de la precipitación.

La teledetección constituye una herramienta aplicada al estudio de las sequías por ser capaz de evaluar el contenido de agua en el territorio utilizando diferentes tipos de índice. El índice normalizado de vegetación y el *NDDI* propuesto por el NDMC son particularmente útiles en el estudio de sequías. En su implementación es necesario distinguir una fase de preproceso de información con programas informáticos que faciliten la importación de los productos adecuados de forma automática y georreferenciar las imágenes al sistema de proyección deseado.

El índice *NDDI* calculado en el presente informe utiliza imágenes de bandas captadas por los sensores del MODIS. Las imágenes MODIS que cubren la totalidad del territorio español están disponibles desde febrero de 2000, lo que supone unos 11 años de imágenes mensuales hasta la actualidad lo que podría considerarse escaso para el cálculo de medias mensuales. Sin embargo, se mantiene la infraestructura necesaria para ir incorporando nuevas imágenes en el futuro.



Se ha comprobado el comportamiento estacional del índice *NDDI* y la necesidad de definir series de desviaciones respecto a los valores normales. Una anomalía positiva sería indicativa de una situación seca, mientras que una negativa lo sería de una húmeda. La definición de sequías se apoya en la propuesta de un umbral de sequía basado en un % de desviación del índice *NDDI*, a semejanza de la definición de sequías más usual basada en el índice de precipitación estandarizada. Y a escala regional se ha definido una sequía cuando el área en sequía de una región supera un segundo umbral. Si conceptualmente las imágenes de teledetección ofrecen información sobre el estado de humedad en la vegetación y suelo, este índice aporta información sobre aspectos relacionados con la generación de escorrentía y, por tanto, de las etapas iniciales en el desarrollo de una sequía, siendo de utilidad en los sistemas de prevención y mitigación de sequías.

5 EQUIPO DE TRABAJO

El presente informe ha sido elaborado por el Área de Recursos Hídricos del Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX. Son autores del mismo D. José Julio Villaverde Valero, Licenciado en Ciencias Geológicas y Director de Programa, D. Luis Miguel Barranco Sanz, Doctor en Ciencias Geológicas y Director de Programa, Dña. Ángela Potenciano de las Heras, Doctora en Ciencias Geológicas y Personal I+D del Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX y el abajo firmante y director del proyecto. Los apartados dedicados a índices de sequías derivados de la información procedente de la teledetección han sido elaborados gracias a la colaboración de María del Carmen Ángel Martínez, licenciada en Ciencias Geológicas y Directora de Programa y de Juan José Domínguez Gómez, licenciado en Ciencias Físicas, Doctor en Ciencias Ambientales y Técnico Superior, ambos del Área de Tecnologías de la Información del Centro de Estudios Hidrográficos. La labor de edición del documento ha sido realizada por Mercedes Montero Rumbao.

Madrid, noviembre de 2013

El director del trabajo

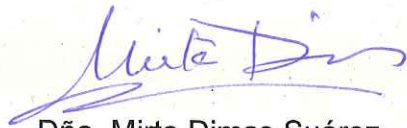


D. Javier Álvarez Rodríguez

Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

Coordinador de Programa Técnico Científico del Área de Recursos Hídricos

Examinado y conforme



Dña. Mirta Dimas Suárez

Ingeniera de Caminos, Canales y Puertos

Jefa de Área de Recursos Hídricos

6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alley, W. (1984). The Palmer Drought Severity Index: Limitations and Assumptions. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, vol.23 pp.:1100-1109
- Álvarez-Rodríguez, J. (2011). Estimación de la distribución espacial de la precipitación en zonas montañosas mediante métodos geoestadísticos. Tesis Doctoral. Ingeniería Civil: Hidráulica y Energética. E.T.S.I. Caminos, Canales y Puertos (UPM). <http://oa.upm.es/8820/>
- Álvarez J.; Sánchez A.; Quintas L. (2005). SIMPA, a GRASS based Tool for Hydrological Studies. *International journal of geoinformatics*, v. 1, n. 1
- Álvarez-Rodríguez, J.; Estrela, T. (2000). Regionalization and Drought Characterisation in Europe. ARIDE Technical Report no. 9. CEDEX, Madrid, Spain. ARIDE, Assessment of the Regional Impact of Droughts in Europe, ENV4 - CT97 - 0553. Enero 1998 - diciembre 2000
- Álvarez J, Estrela T (2003) Regionalisation and identification of droughts in Mediterranean countries of Europe. En: Rossi G, Cancelliere A, Pereira LS, Oweis T, Shatanawi M and Zairi A (Eds) Tools for Drought Mitigation in Mediterranean Regions, Water Science and Technology Library Volume 44. ISBN 1-4020-1140-7. Kluwer Academic Publishers, pp 123–146
- Barrera, A.; Llasat Botija, M.C. (2005). Nota sobre la evaluación de la situación de sequía en España (septiembre 2004-mayo 2005). RAM. Revista del Aficionado a la Meteorología. Nº 33, sep 2005. <http://www.meteored.com/ram>
- Bayarjargal, Y.; Karniel, A.; Bayasgalan, M.; Khudulmur, S.; Gandush, C.; Tucker, C.J. (2006). A comparative study of NOAA–AVHRR derived drought indices using change vector analysis. *Remote Sensing of Environment* 105 (2006) 9-22
- Brown, J.F.; Wardlow, B.D.; Tadese, T.; Hayes M.J.; Reed B.C. (2008). The Vegetation Drought Response Index (VegDRI): A New Integrated Approach for Monitoring Drought Stress in Vegetation. *GIScience & Remote Sensing*, Vol: 45, Nº 1, pp,: 16-46. DOI: 10.2747/1548-1603.45.1.16
- Byun, H.R.; Wilhite, D.A. (1999). Objective Quantification of Drought Severity and Duration. *J. Climate*, 12, 2747–2756
- Byun, H. R.; Lee, D. K. (2002). Defining three rainy seasons and the hydrological summer monsoon in Korea using available water resources index. *J. Meteor. Soc. Japan*, 80, 33-44
- Cancelliere, A.; Ancarani, A.; Rossi, G. (1995). Identification of drought periods on streamflow series at different time scales. In: *Water Resources Management under Drought or Water shortage Conditions*, (editor Tsiourtis). Balkema, Rotterdam
- Chow V.T., Maidment, D.R.; Mays L.W. (1988). *Applied Hydrology*. New York, McGraw-Hill



CEDEX

- Chung, C. H.; Salas, J.D. (2000). Drought Occurrence Probabilities and Risks of Dependent Hydrologic Processes. *Journal of Hydrologic Engineering* 5(3): 259-268
- Chuvienco, E. (1996). *Fundamentos de Teledetección espacial (3ª Ed.)*. Ediciones RIALP. ISBN: 843213127X
- Cohen, W.B. (1991). Response of vegetation indices to changes in three measures of leaf water stress. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol: 57, pp.:195-202
- Cubillo, F. (2001). Uso y gestión eficiente del agua en abastecimientos urbanos. *Revista de Obras Públicas* 2001, 148, (3414), pp.: 127-136
- Cubillo, F. (1994). Las sequías y los métodos de evaluación de la capacidad de suministro de los sistemas hidráulicos de abastecimiento. *Revista de Obras Públicas* 1994, 141, (3335), pp.: 25-33
- Demuth; Stahl Ed. (2000) ARIDE - Second Annual Report (1999)
- Demuth; Stahl Ed. (1999) ARIDE - First Annual Report (1998)
- Dracup, J.A.; Seong, L.K.; Paulson E.G. (1980a). On the statistical characteristics of drought events. *Water Resources Research*. Vol 16, nº 2, abr 1980. pp.: 289-296
- Dracup, J.A. ; Seong, L.K.; Paulson E.G. (1980b). On The definition of droughts. *Water Resources Research*. Vol 16. Nº 2, abr 1980. pp.: 297-302
- EXELISVIS (2006). ENVI 4.3 (the Environment for Visualizing Images).
<http://www.exelisvis.com/ProductsServices/ENVI/Tutorials.aspx>
<http://www.exelisvis.com/language/en-US/Downloads/ProductDownloads.aspx>
- EROS (2011). ModisTools. MODIS REPROJECTION TOOL Land Processes DAAC USGS Earth Resources Observation and Science (EROS) Center
https://lpdaac.usgs.gov/sites/default/files/public/mrt41_usermanual_032811.pdf
- Estrada, F. (1996). *Caracterización y análisis de sequías*. Máster Internacional de Hidrología General y Aplicada. Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX. Madrid. España
- Estrada, F., (1994). *Garantía en los sistemas de explotación de los recursos hidráulicos*. Spanish. Monografías CEDEX, 40. Ministerio de Fomento
- Estrela, T., Cabezas F.; Estrada F. (1999). La evaluación de recursos hídricos en el Libro Blanco del Agua en España. *Revista de Ingeniería del Agua*. Volumen 6. nº 2. pág 125 - 138. Junio 1999
- ESRI, 2011. *ArcGIS Desktop: Release 9*. Redlands, CA: Environmental Systems Research Institute
- European Commission-Environment, EC-E (2007). *Mediterranean Water Scarcity & Drought Report*. Mediterranean Water Scarcity & Drought Working Group (MED WS&D WG) (2007-04-00).
http://www.emwis.net/topics/WaterScarcity/PDF/MedWSD_FINAL_Edition

- Fernández, B.; Salas, J.D. (1999a). Return Period and Risk of Hydrologic Events. I: Mathematical Formulation. *Journal of Hydrologic Engineering* 4(4): 297-307
- Fernández, B.; Salas, J.D. (1999b). Return Period and Risk of Hydrologic Events. II: Applications *Journal of Hydrologic Engineering* 4(4): 308-316
- Fiering, B. y. Jackson, B. (1971). *Synthetic Streamflows*. Washington, D. C., AGU, pp.: 98
- Frantzova, A. ; Peev, V. ; Stanchev, M. (2010). Remote Sensing for land Surface Application: Wildfire and Drought. *BALWOIS 2010 - Ohrid, Republic of Macedonia - 25, 29 May 2010* 1
- Gao, B. (1996). NDWI. A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 58, pp.: 257-266
- García, S.G.; Baille, A.; González, M.M.; Martínez, V.; Urrea, M.; Hernández, Z.; Nortes, P.; Maliko, T. (2007). Desarrollo y aplicación de indicadores de alerta temprana frente a sequías a escala regional desde MODIS. XII Congreso de la Asociación Española de Teledetección. Teledetección. Hacia un mejor entendimiento de la dinámica global y regional, Ed. Martín. ISBN 978-987-543-126-3: 223-229. Ponencia oral. Mar del Plata, Argentina
- Garen, D.C. (1993). Revised Surface-Water Supply Index For Western United States. *J. Water Resour. Plann. Manage.* 1993.119:437-454
- González-Alonso, F.; Cuevas, J.M. (2004): Spanish vegetation monitoring during the period 1987-2001 using NOAA-AVHRR images. *INT. J. Remote sensing*, 10 January, 2004, Vol. 25, Nº. 1, 3-6
- González-Alonso, F.; Calle, A.; Vázquez, A.; Casanova, J.L.; Cuevas, J.M.; Romo, A. (2001). Seguimiento de la sequía en España, en el año 2000, mediante técnicas de teledetección espacial. En *Teledetección, Medio Ambiente y Cambio Global*. (J.I. Rosell; J.A. Martínez-Casasnovas Eds.). 83-85
- Gottschalk, L. (2004) Time series modelling. En: *Hydrological drought – processes and estimation methods for streamflow and groundwater* (Eds: Tallaksen, L.M.; Lanen, H.A.J. van), *Dev. in Wat. Sci.* 48, Elsevier B.V., The Netherlands, 273-306
- GRASS Development Team (2008). *Geographic Resources Analysis Support System (GRASS) Software*. Open Source Geospatial Foundation Project. <http://grass.osgeo.org>
- GRASS Development Team, (2007). *GRASS 6.2 Users Manual*. ITC-irst, Trento, Italy. Electronic document: http://grass.osgeo.org/grass62/manuals/html62_user/
- Gu, Y.; Brown, J.F.; Verdin, J.P.; Wardlow, B. (2007). A five-year analysis of MODIS NDVI and NDWI for grassland drought assessment over the central Great Plains of the United States. *Geophysical Research Letters*, Vol. 34, L06407, doi: 10.1029/2006GL029127



- Harris, A.; Bryant, R.G; Baird, A.J. (2005). Detecting near-surface moisture stress in Sphagnum spp. *Remote Sensing of Environment*, 97, (3), 371-381., doi: 10.1016/j.rse.2005.05.001
- Hayes, M.J.; Wilhelmi O.V.; Knutson C.L. (2004) Reducing Drought Risk: Bridging Theory and Practice. *Natural Hazards Rev.*, Volume 5, Issue 2, pp.: 106-113
- Heim, R.R.Jr., (2002). A review of Twentieth-Century drought indices used in the United States. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 83, 1149-1165
- Heras, R. (1973). Estudios de Sequías. Centro de Estudios Hidrográficos. Escuela de Hidrología. Publicación nº 93. Servicio de Publicaciones de la Secretaría General Técnica del Ministerio de Obras Públicas.
- Hisdal, H.; Tallaksen, L.M.; Peters, L.; van Lanen, H.; Stahl, K.; Demuth, S. (1999) Drought Event Definition. Technical Report nº. 6 for ARIDE project
- Huete, A. R., Didan, K., Miura, T., Rodríguez, E. P., Gao, X., & Ferreira, L. G. (2002). Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 83, pp.: 195–213
- Huete, A.R.; Liu, H.Q.; Batchily, K.; Van Leeuwena, W. (1997). A comparison of vegetation indices over a global set of TM images for EOS-MODIS. *Remote Sensing of Environment* 59(3): 440-451
- Huete, A. R., Justice, C.; Liu, H. (1994). Development of vegetation and soil indices for MODIS-EOS. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 49, pp.: 224–234
- Huete, A. R. (1987). Spectral signatures and vegetation indices. II Reunión Nacional del Grupo de Trabajo en Teledetección, Valencia, pp.:13-26
- Hunt, E.R.; Rock, B.N. (1989). Detection of changes in leaf water content using near and middle-infrared reflectances. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 30, pp.:2523-2534
- Keyantash, J.; Dracup, J.A. (2002). The Quantification of Drought: An Evaluation of Drought Indices. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 83, 1167–1180
- Kogan. F.N. (2001). Operational Space Technology for Global Vegetation Assessment. PDF Bull. Amer. Meteor. Soc. 82, 9, 1949-1964
- Kogan, F.N. (1997). Global Drought Watch from Space. *Bulletin of the American Meteorological Society*. Vol. 78, No. 4, April 1997, pp: 621-636
- Kogan, F.N. (1995a). Droughts of the late 1980's in the United States as Derived from NOAA Polar Orbiting Satellite Data. Vol. 76, No. 5, May 1995, pp: 655-668
- Kogan, F.N. (1995b). Application of vegetation index and brightness temperature for drought detection. *Advanced Space Research*, Vol. 15, pp.: 91-100
- Llasat, M.C.; Quintas, L. (2004). Stationarity of Monthly Rainfall Series since the Middle of the XIXth Century. Application to the Case of Peninsular Spain. *Natural Hazards*. Nº 31. pp.: 613-622
- Llasat, M.C.; Capó, E. (1999). Definición de un índice meteorológico global para el diagnóstico de situaciones de sequía en España. Convenio de Colaboración

- entre el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas y la Fundación Bosch y Gimpera (Universidad de Barcelona). Inédito
- Lin, M.L.; Wang, Q.; Sun, F.; Chu, T.H.; Shiu Y.S. (2010). Quick Spatial Assessment of Drought Information Derived from MODIS Imagery Using Amplitude Analysis. World Academy of Science, Engineering and Technology 67
- Loaiciga, H.A.; Marino, M.A. (1991). Recurrence Interval of Geophysical Events. Journal of Water Resources Planning and Management-ASCE 117(3): 367-382
- MAGRAMA (2008). Gestión de la sequía de los años 2004 a 2007. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, España. 198 pp.
- MAGRAMA (2007). Planes Especiales de Sequía. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Secretaría de Estado de Medio Ambiente. Dirección General del Agua. Secretaría General Técnica del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Madrid³⁵
- MAGRAMA (2000a). Plan Hidrológico Nacional. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Secretaría de Estado de Medio Ambiente. Dirección General del Agua. Secretaría General Técnica del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Madrid.
- MAGRAMA (2000b). Libro Blanco del Agua en España. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Secretaría de Estado de Medio Ambiente. Dirección General del Agua. Secretaría General Técnica del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Madrid. 637 pp.
- Marcos Valiente, Ó. (2001). Sequías: Definiciones, tipologías y métodos de cuantificación. Investigaciones Geográficas 26 (2001), pp.: 59-80. Instituto Universitario de Geografía. Universidad de Alicante
- Maunder, J. (1990). El impacto humano sobre el clima. Arias Montano. Madrid
- McKee, T.B.; Doesken, N.J.; Kleist. J. (1995). Drought Monitoring with Multiple Time Scales. American Meteorological Society, 9th. Conference on Applied Climatology. pp.: 233-236. January 15–20, Dallas, Texas
- McKee, T.B.; Doesken, N.J.; Kleist. J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. Preprints, 8th Conference on Applied Climatology, pp.: 179–184. January 17–22, Anaheim, California
- Menéndez, M. (1995). Aspectos Hidrológicos de las Sequías. Curso sobre sequías. Las sequías en España. Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX. Madrid. España
- Mishra, A.K.; Singh, V.P. (2010). A review of drought concepts. Journal of Hydrology 391 (1-2): 204-216
- Mishra, A.K.; Singh, V.P. (2011). Drought modelling - A review. Journal of Hydrology 403 (1-2): 157-175

35

<http://www.magrama.es/es/agua/temas/observatorio-nacional-de-la-sequia/planificacion-de-la-gestion-de-la-sequia/planes-especiales-de-la-sequia/default.aspx>



- Morales Gil, A.; Olcina Cantos, J.; Rico Amorós, A. (2000). Diferentes percepciones de la sequía en España: adaptación, catastrofismo e intentos de corrección. *Investigaciones geográficas*. 2000, nº 23, pp. 5-46
- Moran, M.S.; Clarke T.R.; Inoue Y.; Vidal A. (1994). Estimating crop water deficit using the relation between surface-air temperature and spectral vegetation index. *Remote Sensing of Environment* Vol.49, pp.: 246–263
- North Atlantic Climatological Dataset (NACD Version 1). Final Report, Scientific Report 96-1, Danish Meteorological Institute
- Oh, S.B.; Kim, D.-W.; Choi, K.S.; Byun, H.R. (2010). Introduction of East Asian Drought Monitoring System. *SOLA*, 2010, Vol. 6A, 009–012, doi:10.2151/sola.6A-003
- Olcina Cantos, J. (1994). Riesgos climáticos en la Península Ibérica. Libros Penthalon. Acción Divulgativa, S.L. Madrid. 440 pp.
- Olcina Cantos, J. (2001). Tipología de sequías en España. *Ería*, 56 (2001), págs. 201-227
- Palmer, W.C. (1965). Meteorological drought. Research Paper No. 45. U.S. Weather Bureau. NOAA Library and Information Services Division, Washington, D.C. 58 pp.
- Peña, D. (2010). Análisis de series temporales. Alianza Editorial. Madrid
- Pereira, L.S.; Paulo, A.A. (2004). Droughts: Concepts, indices and prediction. Hamdy (ed.) *Water Management for Drought Mitigation in the Mediterranean*. 2nd Regional Conference on Arab Water, Cairo, April 12-16, Egypt National Water Resources Center. CIHEAM-IAMB, Bari. pp. 103-132
- Peters, A.J.; Walter-Shea, E.A.; Lei Ji, Viña, A.; Hayes, M.; Svoboda, M.D. (2002). Drought Monitoring with NDVI-Based Standardized Vegetation Index. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* Vol. 68, No. 1, January 2002, pp.: 71-75
- Peters, E.; Bier, G.; van Lanen, H.A.J.; Torfs, P.J.J.F. (2006). Propagation and spatial distribution of drought in a groundwater catchment. *J. Hydrol.* 321: 257–275
- Quintas Ripoll, L. (1996). La base de datos hidrológicos HIDRO del CEDEX. *Ingeniería Civil*, Nº 104. Ministerio de Fomento. Madrid
- R Development Core Team (2008). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org>
- Rahimzadeh-Bajgiran, P.; Omasa, K.; Shimizu, Y., 2012. Comparative evaluation of the Vegetation Dryness Index (VDI), the Temperature Vegetation Dryness Index (TVDI) and the improved TVDI (iTVDI) for water stress detection in semi-arid regions of Iran. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 68 (2012) 1–12
- Real Decreto 1265/2005, de 21 de octubre, por el que se adoptan medidas administrativas excepcionales para la gestión de los recursos hidráulicos y para

corregir los efectos de la sequía en las cuencas hidrográficas de los ríos Júcar, Segura y Tajo.

- Renza, D; Martínez, E.; Águeda Arquero, Á; Sánchez, J. (2010). Drought Estimation Maps by Means of Multidate Landsat Fused Images. Remote Sensing for Science, Education and Natural and Cultural Heritage, Rainer Reuter (Editor)
- Rhee, J.; Im, J.; Carbone, G. J. (2010). Monitoring agricultural drought for arid and humid regions using multi-sensor remote sensing data. Remote Sensing of Environment Vol.114, pp.: 2875–2887
- Rodríguez Fontal, A. (2011). Drought Assessment Using MERIS Images. En Sivakumar et al. (2011). Agricultural Drought Indices. Proceedings of the WMO/UNISDR Expert Group Meeting on Agricultural Drought Indices
- Ruiz García, J.M. (1999). Modelo distribuido para la Evaluación de Recursos Hídricos. Monografía del CEDEX, M-67, Ministerio de Fomento. Publicación de la Tesis Doctoral
- Salas, J.D.; Fu, C.J.; Cancilliere, A.; Dustin, D.; Bode, D.; Pineda, A.; Vincent, E. (2005). Characterizing the severity and risk of drought in the Poudre River, Colorado. Journal of Water Resources Planning and Management-ASCE 131(5): 383-393
- Salas, J.D.; Delleur, J.W.; Yevjevich V.; Lane W.L. (1985). Applied Modelling of Hydrologic Time Series. Water Resources Publications
- Sánchez, S.; Andreu, J.; Solera, A, (2000). Gestión de Recursos Hídricos con decisiones basadas en la estimación del riesgo. Spanish. Universidad Politécnica de Valencia. E.T.S.I. de C. C. y P. Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente. Grupo de Recursos Hídricos. Valencia
- Sandholt, I.; Rasmussen, K.; Andersen, J. (2002). A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status. Remote Sensing of Environment Vol.79 (2-3), pp.: 213–224
- Sellers, P.J. (1985). Canopy Reflectance, Photosynthesis and Transpiration. International Journal of Remote Sensing 6: 1335-1372
- Shafer, B.A.; L.E. Dezman. 1982. Development of a Surface Water Supply Index (SWSI) to assess the severity of drought conditions in snowpack runoff areas. In Proceedings of the Western Snow Conference, pp.: 164–175. Colorado State University, Fort Collins, Colorado
- Shiau, J.T.; Shen, H.W. (2001). Recurrence analysis of hydrologic droughts of differing severity. Journal of Water Resources Planning and Management-ASCE 127(1): 30-40
- Singh, R.P.; Roy, S.; Kogan, F.N. (2003). Vegetation and temperature condition indices from NOAA AVHRR data for drought monitoring over India. Int. J. Remote Sensing, 20 Noviembre, 2003, Vol. 24, No. 22, 4393–4402
- Sivakumar, M.V.K.; Motha, R.P.; Wilhite, D.A.; Wood, D.A. (Eds.). (2011). Agricultural Drought Indices. Proceedings of the WMO/UNISDR Expert Group Meeting on



CEDEX

Agricultural Drought Indices, 2-4 June 2010, Murcia, Spain: Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization. AGM-11, WMO/TD No. 1572; WAOB-2011. 197 pp.

- Smakhtin, V.U.; Hughes, D.A. (2004). Review, Automated Estimation and Analysis of Drought Indices in South Asia, Working Paper 83, International Water Management Institute, Sri Lanka, 24 pp.
- Stahl, K.; Demuth, S. (1999) Method for Regional Classification of Streamflow Drought Series: Cluster Analysis. Technical Report no. 1, ARIDE project
- Tallaksen, L.M.; van Lanen, H. (2004). Hydrological Drought – Processes and Estimation Methods for Streamflow and Groundwater”. Development in Water Sciences no. 48. Elsevier Publ. Holanda
- Tallaksen, L.M.; Madsen, H.; Clausen, B. (1997). On the definition and modelling of streamflow drought duration and deficit volume. Hydrological Science Journal, 42 (1), Feb., 1997
- Témez, J.R. (1977). Modelo matemático de transformación Precipitación Aportación, ASINEL 1977
- Tsakiris, G.; Todorovic, B. (1995). Computer aided integrated water resources management for analysing drought conditions. Water Resources Management under drought or Water Shortage Conditions. Tsiortis (ed.). Balkema. Rotterdam
- Tucker, C.J. (1980). Remote sensing of leaf water content in the near infrared. Remote Sensing of Environment Vol.10, pp.: 23–32
- Van Loon, A.F.; Van Huijgevoort, M.H.J.; Van Lanen, H.A.J. (2012). Evaluation of drought propagation in an ensemble mean of large-scale hydrological models. Hydrol. Earth Syst. Sci., 16, 4057–4078, doi:10.5194/hess-16-4057-2012
- Vázquez, A.; González-Alonso, F.; Calle, A.; Cuevas, J.M.; Casanova, J.L. (2001). Producción asegurada de cereales y anomalías en el índice de vegetación en España Peninsular. En Teledetección, Medio Ambiente y Cambio Global. (J.I. Rosell y J.A. Martínez-Casasnovas Eds.). 37-40
- Vermes, L. (1998). How to work out a drought mitigation strategy. ICID guide. Comisión Internacional de Riegos y Drenajes. Guidelines for water management
- Verstraeten, W.W.; Veroustraete, F.; Feyen, J. (2001). Monitoring water limited carbon mass fluxes over Europe using NOAA-AVHRR imagery and an adapted PEM Model C-FIX.
- Vicente-Serrano, S.M.; Cuadrat-Prats, J.M.; Romo, A. (2006). Aridity influence on vegetation patterns in the middle Ebro Valley (Spain): Evaluation by means of AVHRR images and climate interpolation techniques. Journal of Arid Environments 66(2): 353-375
- Vicente-Serrano, S.M. (2007). Evaluating the Impact of Drought Using Remote Sensing in a Mediterranean, Semiarid Region. Natural Hazards (2007) 40, pp.:173–208
- Vicente-Serrano, S.M.; Beguería, S.; Gimeno, L.; et al. 2012. Challenges for drought mitigation in Africa: The potential use of geospatial data and drought information

- systems. *Applied Geography* Volume: 34, 471-486 DOI: 10.1016/j.apgeog.2012.02.001
- Vidaillet, J.D. (2012). Estudio de sequías de la península Ibérica mediante teledetección durante el periodo de observación MODIS (2000-2010)
- Vogelman, J.E. (1990). Comparison between two vegetation indices for measuring different types of forest damage in the Noeth-Eastern United States. *International Journal of Remote Sensing*, Vol: 12, pp.: 2281-2297
- Washington-Allen, R.A.; Ramsey, R.D.; West, N.E., 2004. Spatiotemporal mapping of the dry season vegetation response of sagebrush steppe. *Community Ecology* 5 (1): 69-79, 2004. 1585-8553/\$20.00 0 Akadkmiak Kiadd, Budapest
- Wilhelmi, O.V.; Wilhite, D.A., (2002). Assessing Vulnerability to Agricultural Drought: A Nebraska Case Study. Drought Mitigation Center Faculty Publications. Paper 9
- Wilhite, D.A. (2011). Quantification of Agricultural Drought for Effective Drought Mitigation and Preparedness: Key Issues and Challenges. En Sivakumar et al. (2011). *Agricultural Drought Indices*. Proceedings of the WMO/UNISDR Expert Group Meeting on Agricultural Drought Indices
- Wilhite, D.A. (2006). Drought monitoring and early warning: concepts, progress and future challenges. World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland. WMO No. 1006
- Wilhite, D.A.; Svoboda, M.D. (2001). Drought Early Warning Systems in the Context of Drought Preparedness and Mitigation. National Drought Mitigation Center. Lincoln, Nebraska. EE.UU.
- Wilhite, D.A. (1993). The Enigma of Droughts. En *Drought assessment, management and planning: theory and case studies*. Natural resource management and policy. Ariel Dinar y David Zilberman, Series Editors. Kluwer Academic Publishers
- Wilhite, D.A.; Rosenberg, N.J.; Glantz, M.H. (1986). Improving federal response to drought. *J. Clim. Appl. Meteorol.*, 25(23), pp.: 332–342.
- Wilks, D.S. (2006). *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. 2ª edición. International Geophysics Series, pp.: 464 Academic Press
- Wang, PX.; Li, X.; Gong, J.; Song, C. (2001). Vegetation Temperature Condition Index and Its Application for Drought Monitoring. *IEEE*, pp.: 141-143.
- Woodhouse, C.A.; Overpeck, J.T. (1998). 2000 years of drought variability in the central United States. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 79(12), pp.: 2693–2714
- Yevjevich, V. (1983). Methods for determining statistical properties of droughts. In: *Coping with Droughts* (Eds. V. Yevjevich, L. Da Cunha; E. Vlachos), Water Resources Publications, Fort Collins, Colorado, EE.UU. 417 pp.