

Estudio de Riesgo Climático para la Implementación de la E2050 de Colombia - Fase 2

CO-T3812-002

Análisis de Riesgo de Línea Base
(Entregable 2)

Anexo 4: Evaluación del Riesgo por Sequías

Preparado para:



Ambiente



Enero de 2024

Consultor

INGENIAR CAD/CAE Ltda.
Carrera 19A # 84-14 OF 504
Edificio Torrenova
Tel. 57-1-691-6113
Fax 57-1-691-6102
Bogotá, D.C., Colombia
www.ingeniar-risk.com



Cardona, Omar-Darío; Bernal, Gabriel A.; Villegas, Claudia P.; González, Diana M.; Rincón, David F.; Molina, John F.; Grajales, Sthefania; Herrera, Sergio A.; Acosta, Mariana; Suárez, Dora C.; Pérez, Maria del Pilar; Marulanda, Paula M.; Marulanda, Mabel C. (2024). Estudio de Riesgo Climático para la Implementación de la E2050 de Colombia - Fase 2, Análisis de Riesgo de Línea Base – A.4 Evaluación del Riesgo por Sequías. Banco Interamericano de Desarrollo, Minambiente de Colombia.

TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN	4
1.1	MODELO DE CÁLCULO	4
2	MODELACIÓN DE LA AMENAZA POR SEQUÍA	6
2.1	EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA	6
2.2	INDICADORES	7
2.3	DEFINICIÓN DE EVENTOS REGIONALES DE SEQUÍA	9
3	MODELACIÓN DE LA EXPOSICIÓN	11
3.1	LOCALIZACIÓN DE CULTIVOS	13
3.2	ESTACIONALIDAD	15
3.3	RENDIMIENTO	16
3.4	SUELO	18
3.5	AVALÚO.....	18
4	MODELACIÓN DE LA VULNERABILIDAD	20
4.1	RENDIMIENTO COMO FUNCIÓN DEL CONSUMO DE AGUA.....	20
4.1.1	CLIMA.....	22
4.1.2	CULTIVO.....	22
4.1.3	SUELO.....	29
4.2	LA DINÁMICA DE LA RESPUESTA DE LOS CULTIVOS AL ESTRÉS HÍDRICO	36
5	EVALUACIÓN DEL RIESGO	41
5.1	CURVA DE EXCEDENCIA DE PÉRDIDAS	42
5.2	MÉTRICAS DEL RIESGO.....	43
5.2.1	LA PÉRDIDA ANUAL ESPERADA (PAE)	44
5.2.2	LA PÉRDIDA MÁXIMA PROBABLE (PML)	44
5.2.3	LA PROBABILIDAD DE QUIEBRA (PQ)	44
5.2.4	OTRAS MÉTRICAS DEL RIESGO.....	44
5.3	RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN	45
6	REFERENCIAS.....	77

1 INTRODUCCIÓN

La sequía es un evento cuya definición exacta es difícil de establecer, con fechas de inicio y fin, así como una extensión geográfica e intensidad, que dependen de criterios más o menos arbitrarios con los cuales se establezcan estos parámetros. Así mismo, es común diferenciar entre sequía meteorológica, agrícola e hidrológica, en función sistema sobre el cual se mide del desbalance de agua, así como sus impactos. Este trabajo se centra en sequía agrícola sobre varios productos en diferentes ubicaciones, y en donde se aplica un enfoque que no requiere de una definición explícita de los eventos de sequía, sino de una simulación de sus impactos a la producción agrícola, lo cual reduce la arbitrariedad inherente a la definición de los eventos.

La modelación del riesgo por sequía se concentra en los municipios de San Onofre (Sucre), Lorica (Córdoba), Espinal y Guamo (Tolima). Se incluyen los portafolios de Maíz amarillo, Maíz blanco, Arroz y Yuca, con sus correspondientes variaciones por ciclo del año y nivel de tecnificación, lo cual resulta en un total de 30 portafolios agrícola modelados.

Tabla 1. Municipios seleccionados para la evaluación

Departamento	Municipios
Tolima	<ul style="list-style-type: none">• Espinal• Guamo
Córdoba	<ul style="list-style-type: none">• Lorica
Sucre	<ul style="list-style-type: none">• San Onofre

1.1 Modelo de cálculo

La sequía es un fenómeno climático transitorio, que se caracteriza por una reducción en la disponibilidad de agua con respecto a la requerida para mantener la salud de los ecosistemas, el consumo humano y en general el desarrollo social y económico. Toda sequía se debe, esencialmente, a un desbalance entre la oferta y la demanda de agua. Desde el punto de vista de la atmósfera, esta provee una cierta oferta de agua por medio de la precipitación y demanda a su vez una cierta cantidad de agua por medio del proceso de evapotranspiración. Por lo tanto, cuando ese balance se pierde, es decir, cuando la oferta de agua provista es muy inferior a la demandada, se manifiesta una sequía. Desde el punto de vista agrícola, la oferta de agua se enmarca en el contenido de humedad en el suelo, que puede deberse a precipitación natural o a sistemas de riego, y la demanda es precisamente la cantidad de agua requerida para que la producción agrícola sea la esperada. El desbalance establece una sequía agrícola, en donde el elemento modulador del problema es el suelo. La pérdida de humedad en el suelo limita la producción e incluso, en casos extremos, la impide.

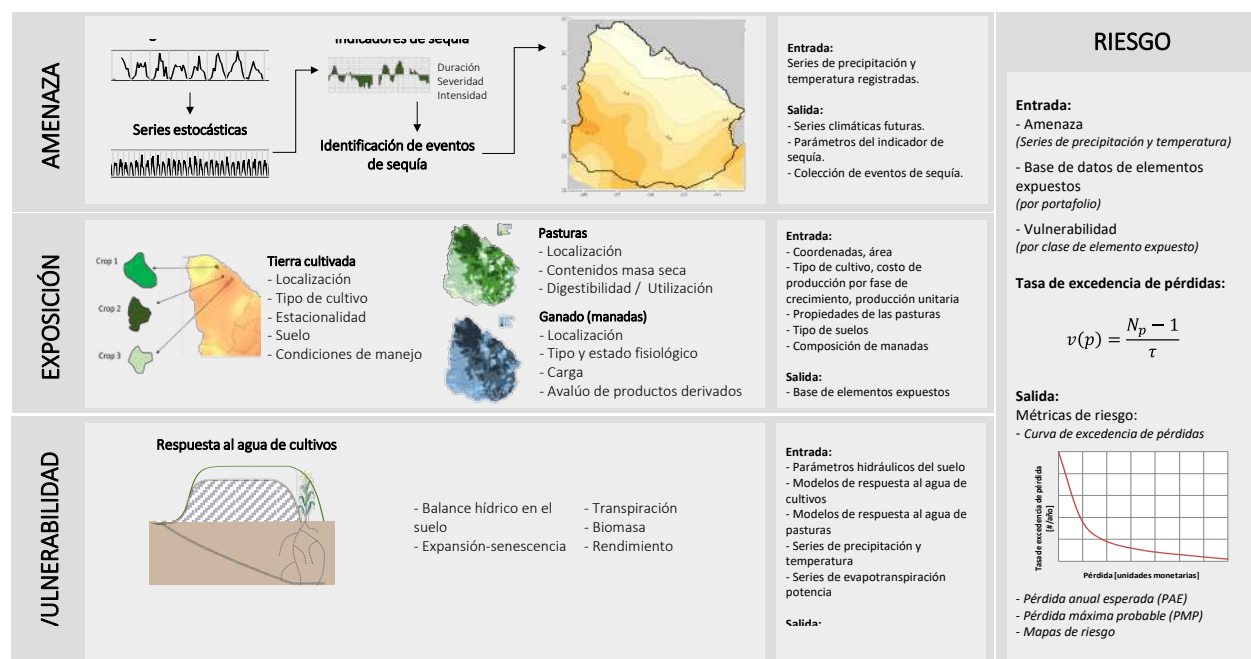


Figura 1. Esquema de componentes del modelo de riesgo por sequía implementado.

Con el objetivo de simular apropiadamente el desarrollo del perfil de humedad en el suelo a lo largo de una temporada productiva, se implementa un modelo de respuesta de cultivos al agua. Este modelo se alimenta con series meteorológicas (precipitación, temperatura, etc.), así como información del cultivo, con lo cual se determina una pérdida económica asociada a la disminución de ingresos que percibe el agricultor por cuenta de la ocurrencia del evento. El modelo de respuesta al agua implementado es el desarrollado por la FAO e implementado en el software AquaCrop (Steduto et al. 2012). Si bien este no es el único modelo de respuesta al agua de cultivos disponible en la literatura, posiblemente es el más empleado a nivel mundial. Este método fue implementado por INGENIAR en el software DroughtPro (Bernal et al. 2017) de la plataforma CAPRA ROBOT, lo cual permite automatizar el proceso de cálculo.

2 MODELACIÓN DE LA AMENAZA POR SEQUÍA

En términos generales, para el caso de la sequía, a partir de las series históricas y sintéticas de precipitación y temperatura se calculan los indicadores de sequía (SPI, SPEI, RDI y otros incluidos en la literatura especializada) para todas las estaciones y a diferentes escalas de tiempo en pasos mensuales. Una vez se obtiene la serie temporal del indicador seleccionado en cada estación, se identifican los eventos de sequía. Los eventos de sequía ocurren cuando el indicador toma un valor por debajo de un umbral crítico.

2.1 Evapotranspiración de referencia

El cálculo de los indicadores de sequía propuestos requiere del cálculo previo de la evapotranspiración de referencia, para evaluar las condiciones atmosféricas que definen si se presenta un exceso de agua en la atmósfera (baja evapotranspiración) o un déficit (alta evapotranspiración y poca lluvia). La evapotranspiración de referencia se estima siguiendo el Manual *Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop requirements* (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 1998), que es considerado el método estándar y es el más recomendado.

La evapotranspiración de referencia es el potencial de evaporación de la atmósfera; se calcula en una superficie vegetal uniforme sin restricciones hídricas. La superficie de referencia es un cultivo hipotético con una altura asumida de 0,12 m, una resistencia superficial fija de 70 s/m y un albedo de 0,23 (Allen et al., 1998); es independiente del tipo de cultivo, de su desarrollo o de su manejo. Al no tener restricciones en el contenido de agua, las características del suelo tampoco influyen en su resultado. Estas condiciones permiten comparar los resultados en diferentes localizaciones o estaciones para evaluar las condiciones evaporativas de la atmósfera ya que el ETo únicamente varía según las condiciones climáticas presentes.

Es importante señalar que la evapotranspiración de referencia (ET_0) es diferente a la evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar (ET_c) y a la evapotranspiración del cultivo bajo condiciones no estándar ($ET_{c_{aj}}$). La evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar (ET_c) considera características particulares según el tipo de cultivo que se esté evaluando (resistencia del cultivo, albedo, anatomía de las hojas, características de los estomas, propiedades aerodinámicas, entre otros). Por otro lado, la evapotranspiración del cultivo bajo condiciones no estándar ($ET_{c_{aj}}$) considera cultivos que crecen bajo condiciones ambientales y de manejo diferentes a condiciones óptimas de suelo y agua, presencia de enfermedades o fertilización que implican cambios en el rendimiento de la cosecha.

El método de Penman-Monteith (ver Ecuación 1) para el cálculo de la evapotranspiración de referencia permite cuantificar los procesos de evaporación (vaporización de agua desde una superficie: suelo, vegetación húmeda) y transpiración (vaporización del agua contenida en los tejidos vegetales), que ocurren simultáneamente. Los parámetros necesarios para el cálculo son el brillo solar, la temperatura, la humedad, la velocidad del viento, el flujo de vapor y la resistencia aerodinámica.

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad \text{Ecuación 1}$$

en donde R_n es la radiación neta, G es el flujo de calor del suelo, γ es la constante psicrométrica, T es la temperatura promedio diaria, u_2 es la velocidad del viento (a 2m de la superficie), $(e_s - e_a)$ representa el

déficit de presión de vapor y Δ es la pendiente de la curva de presión de vapor. La aplicación de la metodología de Penman-Monteith implica la recopilación de información meteorológica que puede no estar disponible en todos los casos. Los parámetros meteorológicos faltantes se establecen a partir de criterio de expertos, información meteorológica general de la región y las reglas de cálculo recomendadas por la FAO (Raes, 2009).

2.2 Indicadores

Los indicadores son ampliamente utilizados para identificar las sequías, al detectar condiciones de precipitación por debajo de la precipitación media y condiciones simultáneas de temperatura por encima de las temperaturas promedio. Los indicadores pueden definir la *duración* y la *severidad* de los eventos de sequía. Las fechas de inicio y terminación establecen el período de duración en el que un indicador de sequía está continuamente por debajo de un nivel crítico predefinido (a menor valor del indicador, más intensa la sequía). La severidad de una sequía denota la deficiencia acumulativa de un parámetro de sequía por debajo de un umbral entre las fechas de iniciación y terminación. La relación entre severidad y duración es la *intensidad* de la sequía (Mishra & Singh, 2010). Estos conceptos se muestran de forma esquemática en la Figura 2. Cada evento de sequía está compuesto por la siguiente información:

- *Severidad*: corresponde al área bajo la curva del evento, es decir, el valor acumulado del indicador durante el evento.
- *Duración*: es el tiempo que dura el evento.
- *Intensidad*: se calcula como la severidad dividida por la duración. Es una medida unitaria de la magnitud del evento.

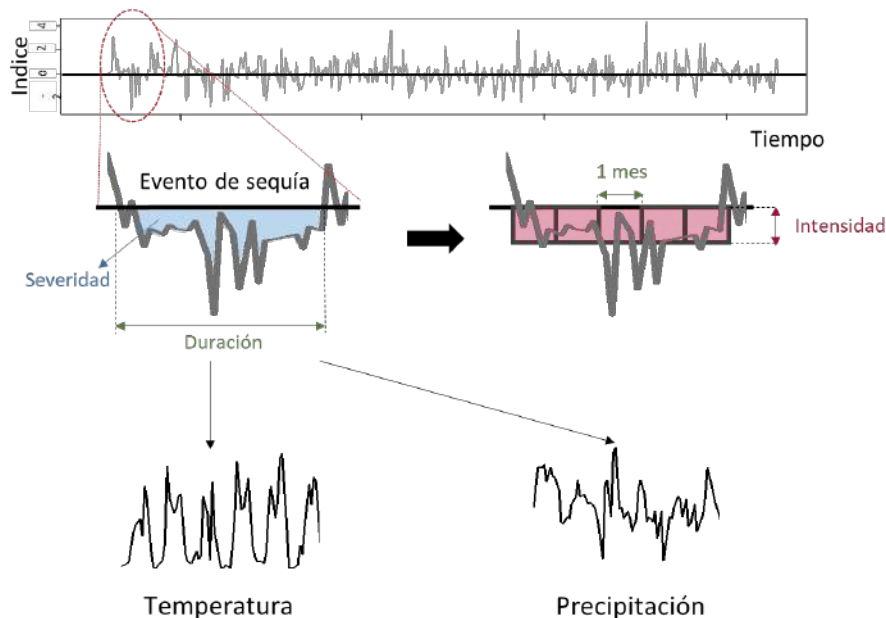


Figura 2. Esquema de indicadores de sequía y conceptos de severidad, duración e intensidad del evento.

Dependiendo del tipo de sequía a evaluar, se pueden incluir diferentes parámetros en el cálculo de los índices. Las sequías meteorológicas están condicionadas a la deficiencia de precipitación en términos de cantidad, intensidad y tiempo de precipitación, y al aumento de la evaporación y transpiración a causa de altas temperaturas, vientos fuertes, baja humedad relativa, intenso sol y menor nubosidad. Las sequías agrícolas están condicionadas por la deficiencia de agua en el suelo en términos de estrés hídrico para las plantas, y la reducción en la biomasa y el rendimiento. Las sequías hidrológicas están determinadas por la reducción en caudales de ríos y quebradas, almacenamiento reducido de los embalses y reducción de los humedales. Esta clasificación de sequías, como sequía meteorológica, agrícola, hidrológica y socioeconómica fue definida por primera vez por Wilhite y Glantz (1985).

Según Jayanthi (2014), los indicadores de sequía agrícola deben integrar las variables pluviométricas y de temperatura, junto con la evapotranspiración para el monitoreo efectivo de los cultivos de secano, pastos y pastizales. Banimahd y Khalili (2013) compararon los índices de sequía agrícola más utilizados, como el Palmer Drought Severity Index - PDSI (Palmer, 1965), el Standardized Precipitation Index -SPI (McKee, Doesken, & Kleist, 1993), el Effective Drought Index -EDI (Byun & Wilhite, 1999), el Reconnaissance Drought Index - RDI (Tsakiris, Pangalou, & Vangelis, 2007) y el Standardized Precipitation Evapotranspiration Index -SPEI (Vicente-Serrano, Beguería, & López-Moreno, 2010). Sus resultados mostraron que la SPEI y la RDI detectaron de manera más apropiada las severidades de sequía máximas, enfatizando el importante papel de la evapotranspiración. Estos resultados son consistentes con el trabajo de Tsakiris et al. (2007), en donde se demuestra que la sola precipitación no correlaciona satisfactoriamente con la producción de rendimiento en cultivos, sino que se requiere la incorporación de la evapotranspiración de referencia (que depende directamente de la temperatura), para describir apropiadamente la ocurrencia de las sequías.

Este estudio no incluye el uso de indicadores que tienen en cuenta parámetros propios del suelo o del cultivo para definir un evento de sequía, como el Indicador de Palmer. Esto se debe a que en el modelo de amenaza por sequía se evalúan las condiciones de tiempo (precipitación y temperatura) únicamente, para clasificar los eventos de sequía independientes de sus posibles efectos en la agricultura. De esta forma se puede evaluar la amenaza independiente de la vulnerabilidad de los elementos expuestos. Es en el modelo de vulnerabilidad en el cual se incluyen los parámetros propios del suelo y cultivos existentes en cada unidad de tierra cultivada dentro del área de estudio.

Los indicadores estandarizados de sequía, como el RDI y el SPEI, pueden compararse entre sí en dimensiones espaciales y temporales. La severidad de la sequía caracterizada aplicando estos indicadores, se puede clasificar de acuerdo con lo presentado en la Tabla 2.

Tabla 2. Clasificación de sequías de acuerdo con el valor de indicadores estandarizados.

Clase de sequía	Valor del Indicador
No ocurre sequía	Mayor a 0
Leve	Entre -1 y 0
Moderada	Entre -1.5 y -1
Severa	Menor a -1.5

Nótese que, en todos los casos, los indicadores reflejan condiciones de sequía cuando sus valores son negativos, siendo las sequías más severas las asociadas a valores más negativos. Es conveniente evaluar los escenarios de sequía con más de un indicador, ya que ninguno de ellos puede aplicarse universalmente

debido a la complejidad de esta amenaza y a las condiciones particulares de las diversas zonas climáticas (Tsakiris et al., 2007). Los indicadores se calculan para cada serie (histórica o simulada) en cada uno de los puntos de la malla de análisis. La Figura 3 muestra un ejemplo del cálculo del indicador de sequía para tres años de la serie histórica e indica la línea del umbral para definir sequías desde los eventos leves (umbral=-1). En este ejemplo, se presenta una sequía de 4 meses entre finales de 1981 y principios de 1982.

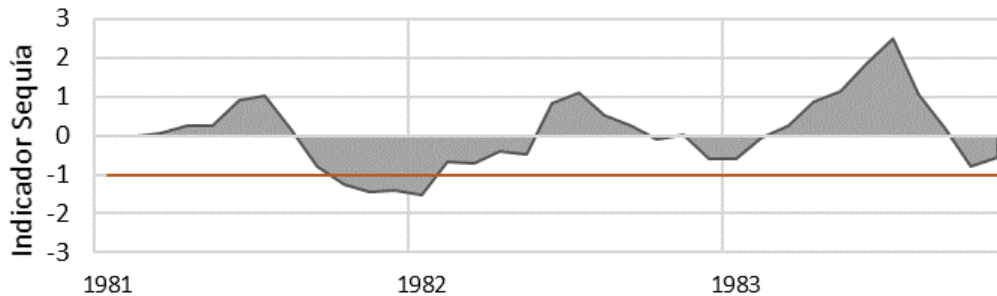


Figura 3. Series de indicador de sequía para 3 meses con umbral=-1.

2.3 Definición de eventos regionales de sequía

El siguiente paso es identificar los eventos de sequía que ocurren simultáneamente en varias estaciones de la región de estudio. Para cada mes, se identifican las estaciones con un valor de indicador por debajo del umbral definido para la evaluación (por ejemplo, -1, para detectar sequías moderadas y severas). Si el número total de estaciones con valores por debajo del umbral es mayor que un cierto porcentaje (por ejemplo, 50%), entonces se identifica una sequía regional. Con cálculos consecutivos para todos los años de simulación, se pueden detectar múltiples sequías regionales, con su valor asociado de duración, severidad e intensidad en cada estación. Cada una de las sequías regionales es un escenario de sequía individual, con una frecuencia anual de ocurrencia igual a $1/N$, en donde N es el número total de años de simulación. La Figura 4 muestra esquemáticamente cómo se identifican las sequías regionales, de acuerdo con los criterios de selección definidos por un valor umbral de indicador y un número mínimo de estaciones que satisfacen dicha condición. Este procedimiento puede aplicarse para toda la región de estudio, o para subregiones definidas por otros criterios, como zonas climáticas, zonas productivas, entidades territoriales, etcétera.

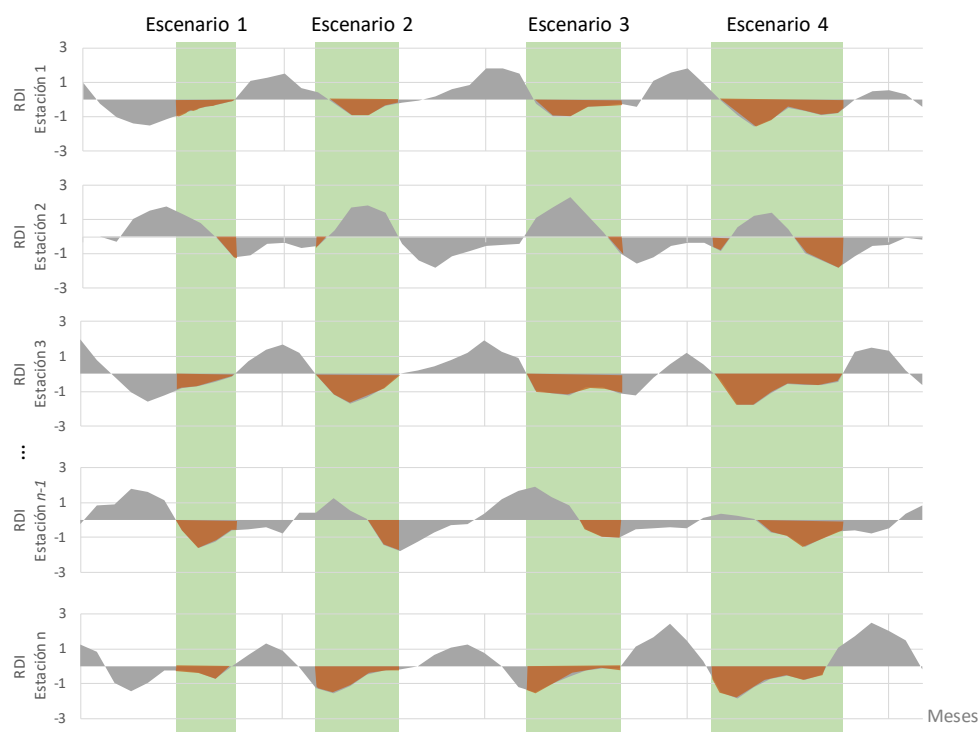


Figura 4. Identificación de sequías regionales sobre las series de tiempo de todas las estaciones del área de estudio.

3 MODELACIÓN DE LA EXPOSICIÓN

Los elementos expuestos de la actividad agrícola son aquellos cultivos plantados en áreas donde se prevé un riesgo vinculado a eventos climáticos extremos. Para el caso agrícola los municipios seleccionados corresponden a San Onofre (Sucre), Lorica (Córdoba), Espinal (Tolima) y Guamo (Tolima). Para cada unidad de tierra cultivada (CLU) en el municipio bajo análisis, es esencial comprender las características de los cultivos típicamente sembrados. Esta información abarca el tipo de cultivo, su estacionalidad, área de siembra y rendimientos habituales (toneladas por unidad de área). La Tabla 3 muestra los datos mínimos necesarios para construir la base de datos de elementos expuestos en el sector agrícola.

Tabla 3. Información de entrada para modelo de exposición del sector agrícola

Información de entrada	Descripción
Mapas de ubicación de cultivos	Ubicación de cultivos y unidades de tierra cultivada georreferenciadas.
Rendimiento de cultivos	Valores de referencia de rendimiento de cultivos para la producción anual y el área total cultivada.
Valoración económica de los cultivos	Costo de producción unitario.
Mapas de tipo de suelo	Textura, grupo hidrológico, y número de curva.

Con base en las Evaluaciones Agropecuarias Municipales (EVA) del 2022, realizadas por la Unidad de Planificación Rural Agropecuaria (UPRA), se llevó a cabo un análisis detallado de los cultivos con mayor extensión de siembra en cada municipio. Este análisis permitió la identificación de aquellos cultivos que tienen una relevancia significativa en el sector, los cuales fueron seleccionados para evaluar el riesgo agrícola asociado a la sequía en cada caso específico. En términos generales, se eligieron el maíz y la yuca para San Onofre (Sucre), mientras que para Lorica (Córdoba), Espinal (Tolima) y Guamo (Tolima) se seleccionaron el arroz y el maíz. Cabe destacar que cada cultivo fue evaluado considerando su ciclo de siembra y sistema productivo.

La EVA 2022 se desarrolla teniendo en cuenta el ciclo productivo y los calendarios de siembras y cosechas. Este proceso implica la recolección de información en dos momentos del año: el primero durante el primer semestre, enfocándose en las áreas sembradas de los principales cultivos transitorios; mientras que el segundo semestre se dedica a la toma de decisiones sobre la siembra, así como a la evaluación de variables agrícolas como áreas sembradas, cosechas, producción y rendimiento semestral de cultivos tanto transitorios como permanentes. Además, se recopila información asociada a las variables operativas procedente de asociaciones, gremios y registros administrativos, según lo gestionado por la UPRA en el año 2022.

En total la evaluación del riesgo se realiza sobre los diferentes portafolios agrícolas, que corresponden a las combinaciones de *Cultivo – Ciclo – Tipo de sistema productivo*, como se muestra de la Tabla 4 a la Tabla 7 para cada municipio.

Tabla 4. Portafolios agrícolas para el municipio de San Onofre (Sucre)

Portafolio	Municipio	Cultivo	Ciclo	Sistema productivo	Número de CLUs
1	San Onofre	Maíz amarillo	A	Tecnificado	1488
2		Maíz amarillo	A	Tradicional	2053
3		Maíz blanco	A	Tecnificado	509
4		Maíz blanco	A	Tradicional	525
5		Maíz amarillo	B	Tradicional	1761
6		Maíz blanco	B	Tradicional	639
7		Yuca	-	-	2813

Tabla 5. Portafolios agrícolas para el municipio de Lorica (Córdoba)

Portafolio	Municipio	Cultivo	Ciclo	Sistema productivo	Número de CLUs
1	Lorica	Arroz	A	Secano	3235
2		Maíz amarillo	A	Tecnificado	6114
3		Maíz amarillo	A	Tradicional	6380
4		Maíz blanco	A	Tecnificado	4783
5		Maíz blanco	A	Tradicional	3810
6		Arroz	B	Riego	6268
7		Arroz	B	Secano	3671
8		Maíz amarillo	B	Tecnificado	2065
9		Maíz amarillo	B	Tradicional	2399
10		Maíz blanco	B	Tecnificado	2017
11		Maíz blanco	B	Tradicional	1527

Tabla 6. Portafolios agrícolas para el municipio de Espinal (Tolima)

Portafolio	Municipio	Cultivo	Ciclo	Sistema productivo	Número de CLUs
1	Espinal	Arroz	A	Riego	4192
2		Maíz amarillo	A	Tecnificado	3944
3		Maíz blanco	A	Tecnificado	3696
4		Arroz	B	Riego	3911
5		Maíz amarillo	B	Tecnificado	3290
6		Maíz blanco	B	Tecnificado	4197

Tabla 7. Portafolios agrícolas para el municipio de Guamo (Tolima)

Portafolio	Municipio	Cultivo	Ciclo	Sistema productivo	Número de CLUs
1	Guamo	Arroz	A	Riego	5966
2		Maíz amarillo	A	Tecnificado	5586
3		Maíz blanco	A	Tecnificado	4539
4		Arroz	B	Riego	5478
5		Maíz amarillo	B	Tecnificado	4829
6		Maíz blanco	B	Tecnificado	5439

3.1 Localización de cultivos

La obtención de información detallada sobre la ubicación y características de los cultivos es esencial para modelar la vulnerabilidad de los elementos expuestos. Sin embargo, esta información suele ser difícil de obtener en su totalidad. Por esta razón, generalmente se hace uso de proxys utilizando la información más relevante disponible en las fuentes oficiales de la zona de estudio.

Para cada municipio, se recurrió a la información publicada por fuentes oficiales, como el Mapa de Clasificación de las Tierras por su Vocación de Uso del IGAC, así como los datos sobre terrenos rurales proporcionados por el IGAC (IGAC, 2023, 2023b). Al combinar estos dos conjuntos de datos, se generaron las unidades de tierra cultivada (CLUs) correspondientes a cada municipio.

En la creación de los mapas que muestran la ubicación y el área sembrada de los cultivos, se tuvieron en cuenta restricciones adicionales, como la presencia de cultivos en áreas protegidas y zonas destinadas a la ganadería. La validación del área resultante se llevó a cabo mediante la comparación de la suma de las áreas asignadas a cada CLU dentro del mismo municipio con el área total sembrada por municipio, según lo reportado en las Evaluaciones Agropecuarias Municipales (EVA) del año 2022. A continuación, de la Figura 5 a la Figura 8, se presenta la ubicación general de los cultivos de cada municipio.

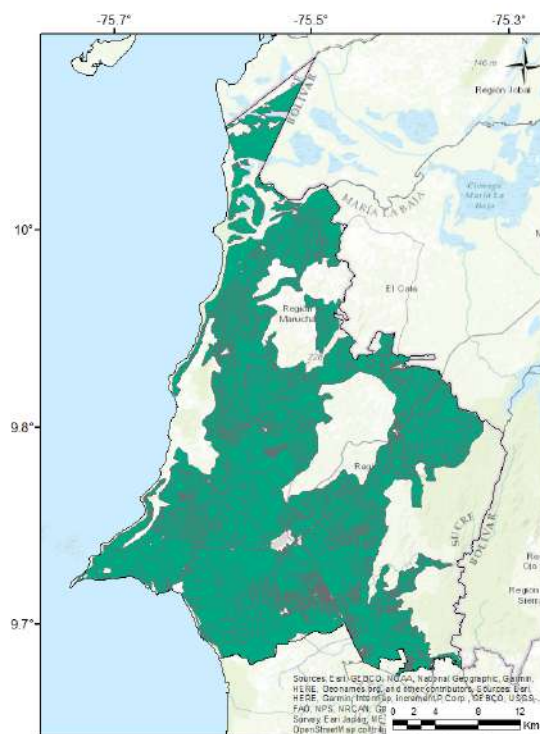


Figura 5. Ubicación de cada CLU en el municipio de San Onofre (Sucre)

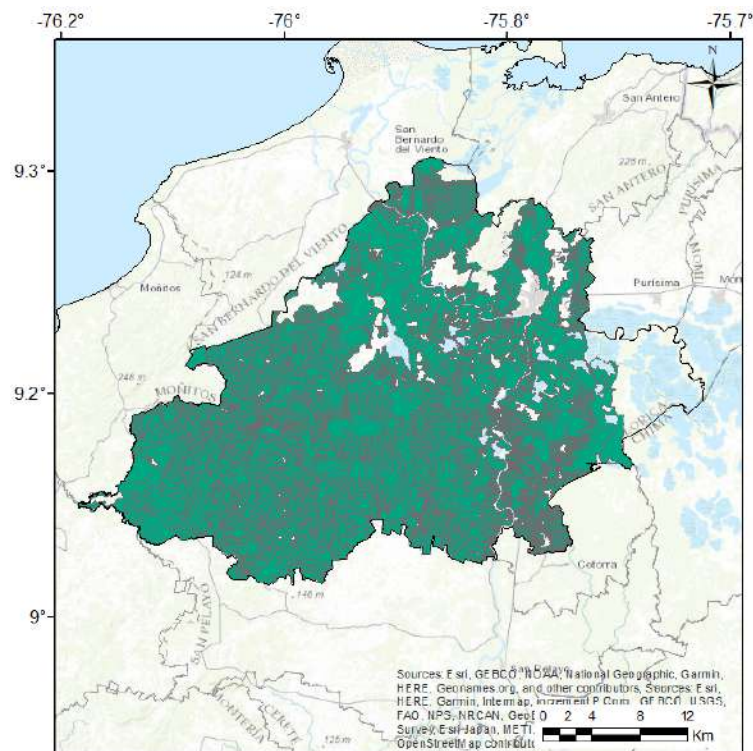


Figura 6. Ubicación de cada CLU en el municipio de Lorica (Córdoba)

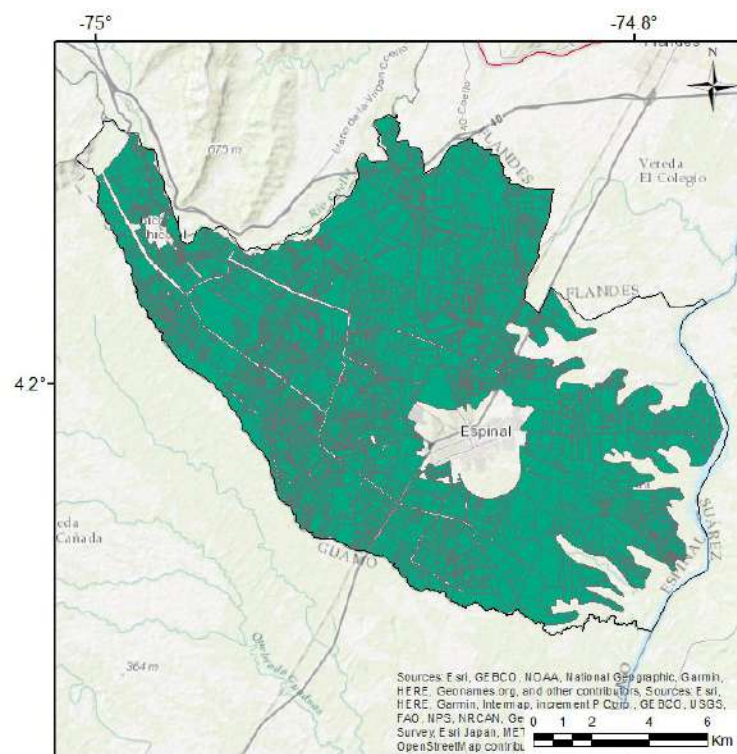


Figura 7. Ubicación de cada CLU en el municipio de Espinal (Tolima)

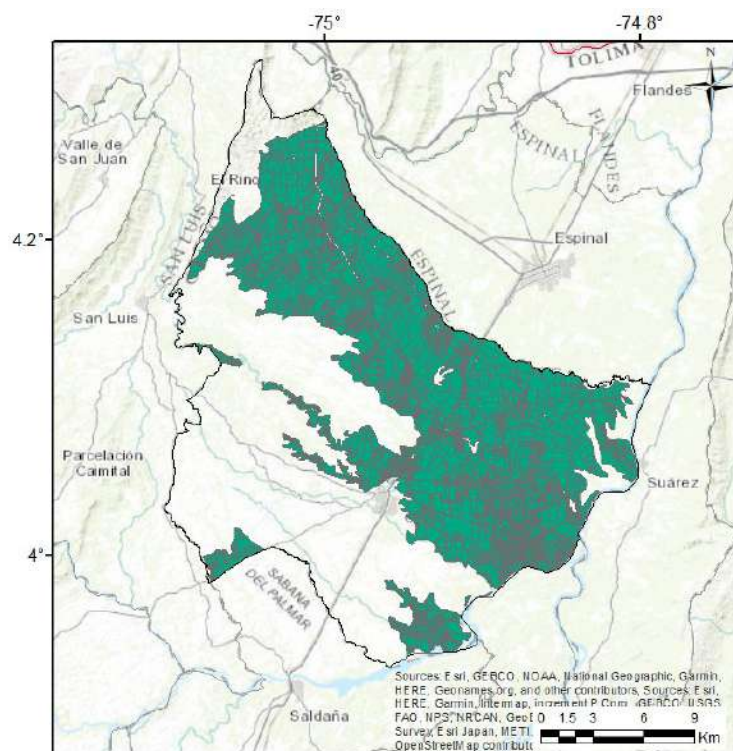


Figura 8. Ubicación de cada CLU en el municipio de Guamo (Tolima)

3.2 Estacionalidad

Un parámetro crucial y específico para cada municipio bajo análisis y tipo de cultivo es el tiempo necesario para completar el ciclo de desarrollo del mismo. En el contexto de modelar la vulnerabilidad de las plantas, resulta fundamental definir, en términos de días calendario, las distintas etapas de crecimiento del cultivo, desde su siembra hasta alcanzar la madurez, tal como se ilustra en la Figura 9. Asimismo, es esencial disponer de información precisa sobre las fechas típicas de siembra y cosecha de cada producto. Estos datos serán posteriormente empleados en el módulo de vulnerabilidad, que vincula el desarrollo diario del cultivo con las series diarias de precipitación y temperatura. El propósito de este módulo es evaluar las posibles reducciones en el rendimiento de la cosecha debido a condiciones de déficit de agua.



Figura 9. Esquema de etapas de crecimiento de una planta (Fuente: Elaboración propia)

Para establecer las fechas de siembra de los cultivos, se consultaron las comunicaciones del Instituto Colombiano Agropecuario – ICA y las Encuestas nacionales de arroz mecanizado (ENAM) desarrolladas por el DANE y FEDEARROZ. La Tabla 8 muestra el resumen de las fechas más comunes de siembra de los diferentes cultivos, según las fuentes consultadas.

Tabla 8. Meses más comunes de siembra a partir de fuentes consultadas

Referencia	Cultivo	Ciclo A	Ciclo B
ICA (2022)	Maíz	Febrero - abril	-
ICA (2023b)	Maíz	Abril - junio	Agosto - septiembre
ICA (2023c)	Maíz	-	Septiembre - octubre
ICA (2023a)	Arroz	-	Octubre - diciembre
DANE (2022)	Arroz	-	Agosto - diciembre
DANE (2023)	Arroz	Marzo - mayo	-
AMCHAM (2014)	Yuca	Meses con mayor lluvia	

3.3 Rendimiento

Dentro de la información esencial para el modelo de exposición, se encuentra el rendimiento típico de cada cultivo, definido en el modelo como la producción total en toneladas por hectárea de terreno sembrada. Estos datos desempeñan un papel crucial en el módulo de vulnerabilidad, que establece la conexión entre el desarrollo diario del cultivo y las series diarias de precipitación y temperatura. El propósito de este módulo es evaluar posibles disminuciones en el rendimiento de la cosecha debido a condiciones climáticas extremas.

Estos rendimientos, provenientes de fuentes oficiales, sirven como valores de referencia para verificar los resultados de rendimiento obtenidos a través del modelo y estimar las pérdidas. No obstante, es importante destacar que estos rendimientos se consideran estáticos en el modelo, ya que no incorpora las potenciales mejoras en las prácticas agrícolas que podrían implementarse en el futuro y que podrían resultar en un aumento del rendimiento de los cultivos.

El modelo de vulnerabilidad, integrado con el modelo de amenaza que incluye la generación estocástica de eventos climáticos extremos, facilita el cálculo de rendimientos tanto para la serie de clima histórico como para la serie de clima simulado. Este enfoque proporciona una mayor cantidad de información sobre la relación entre la gravedad del daño causado por el evento climático y el rendimiento del cultivo. Además, incorpora eventos que no han ocurrido en la historia pero que son relevantes para la evaluación probabilística del riesgo.

De la Tabla 9 a la Tabla 12, se pueden observar los valores de rendimiento tomados en este estudio, correspondientes a los datos proporcionados por las Evaluaciones Agropecuarias Municipales EVA 2022 (UPRA, 2022).

Tabla 9. Rendimiento de cada portafolio para el municipio de San Onofre (Sucre)

Portafolio	Municipio	Cultivo	Ciclo	Sistema productivo	Rendimiento
1	San Onofre	Maíz amarillo	A	Tecnificado	3.4
2		Maíz amarillo	A	Tradicional	2.5
3		Maíz blanco	A	Tecnificado	4.3
4		Maíz blanco	A	Tradicional	2.5
5		Maíz amarillo	B	Tradicional	2.5
6		Maíz blanco	B	Tradicional	2.5
7		Yuca	-	-	15

Tabla 10. Rendimiento de cada portafolio para el municipio de Lorica (Córdoba)

Portafolio	Municipio	Cultivo	Ciclo	Sistema productivo	Rendimiento
1	Lorica	Arroz	A	Secano	3.57
2		Maíz amarillo	A	Tecnificado	4
3		Maíz amarillo	A	Tradicional	2.3
4		Maíz blanco	A	Tecnificado	4
5		Maíz blanco	A	Tradicional	2.3
6		Arroz	B	Riego	3
7		Arroz	B	Secano	3.57
8		Maíz amarillo	B	Tecnificado	4.5
9		Maíz amarillo	B	Tradicional	2.5
10		Maíz blanco	B	Tecnificado	4.5
11		Maíz blanco	B	Tradicional	2.5

Tabla 11. Rendimiento de cada portafolio para el municipio de Espinal (Tolima)

Portafolio	Municipio	Cultivo	Ciclo	Sistema productivo	Rendimiento
1	Espinal	Arroz	A	Riego	7.5
2		Maíz amarillo	A	Tecnificado	4.9
3		Maíz blanco	A	Tecnificado	5.3
4		Arroz	B	Riego	7.3
5		Maíz amarillo	B	Tecnificado	5
6		Maíz blanco	B	Tecnificado	5.4

Tabla 12. Rendimiento de cada portafolio para el municipio de Guamo (Tolima)

Portafolio	Municipio	Cultivo	Ciclo	Sistema productivo	Rendimiento
1	Guamo	Arroz	A	Riego	7
2		Maíz amarillo	A	Tecnificado	6
3		Maíz blanco	A	Tecnificado	5
4		Arroz	B	Riego	7
5		Maíz amarillo	B	Tecnificado	6
6		Maíz blanco	B	Tecnificado	4.5

3.4 Suelo

La base de datos de elementos expuestos de cultivos abarca las variables necesarias para parametrizar el suelo. El modelo utilizado en este estudio adopta un volumen de referencia del suelo, que alberga la zona radicular, y calcula su balance hídrico para determinar la disponibilidad de agua para la planta. Esto permite evaluar las interacciones suelo-planta-atmósfera, fundamentales para modelar el crecimiento y rendimiento de los cultivos. Se asume que el perfil de suelo es homogéneo hasta la máxima profundidad alcanzada por las raíces, según el tipo de cultivo, y no se considera la presencia de barreras físicas que limiten la profundización de las raíces.

La determinación de la textura del suelo se basa en la Base de Datos Armonizada de los Suelos del Mundo (FAO, 2020), la cual recopila información global de 15,000 unidades cartográficas de suelo. Esta base de datos es el resultado de la colaboración entre la FAO, IIASA, ISRIC-Información Mundial de los Suelos, el Instituto de Ciencias de Suelos de la Academia China de las Ciencias (ISSCAS) y el Centro Común de Investigación de la Comisión Europea (JRC).

El mapa de textura del suelo para cada municipio utilizado en este análisis se presenta a continuación en la Figura 10.



Figura 10. Textura del suelo para cada municipio (FAO, 2020).

3.5 Avalúo

La estimación de las pérdidas económicas implica evaluar el valor de la producción. Dado que en la cadena agropecuaria existen diversos costos relacionados con actividades como almacenamiento, transporte, procesamiento y comercialización, entre otras, resulta poco factible valorar la producción en función de los precios finales al consumidor. Se hace necesario emplear una métrica que permita cuantificar las pérdidas para el productor, excluyendo los costos asociados a intermediarios u otros agentes. Por este motivo, se utiliza el concepto de precios al productor, los cuales se definen como el valor pagado en la puerta de la finca. La Tabla 13 muestra los valores empleados en este estudio y la fuente de donde se

obtuvo la información. Los precios corresponden al promedio de los valores de los montos pagados al productor mensualmente del año 2022.

Tabla 13. Avalúo del cultivo para cada municipio

Municipio	Cultivo	\$ COP / Ton	Fuente
San Onofre	Maíz amarillo	\$ 1.666.071	FENALCE (2023)
	Maíz blanco	\$ 1.740.769	FENALCE (2023)
	Yuca	\$ 1.200.000	FINAGRO (2023)
Lorica	Maíz amarillo	\$ 1.529.412	FENALCE (2023)
	Maíz blanco	\$ 1.700.882	FENALCE (2023)
	Arroz	\$ 1.623.000	FEDEARROZ (2023)
Espinal	Maíz amarillo	\$ 1.590.938	FENALCE (2023)
	Maíz blanco	\$ 1.829.063	FENALCE (2023)
	Arroz	\$ 1.769.325	FEDEARROZ (2023)
Guamo	Maíz amarillo	\$ 1.590.938	FENALCE (2023)
	Maíz blanco	\$ 1.829.063	FENALCE (2023)
	Arroz	\$ 1.769.325	FEDEARROZ (2023)

4 MODELACIÓN DE LA VULNERABILIDAD

La modelación de la vulnerabilidad se realiza siguiendo la metodología de cálculo del rendimiento definida por la FAO. La vulnerabilidad se define en términos de la pérdida de rendimiento que sufre el cultivo durante un período prolongado de escasez de agua. Dado que se aplica un modelo agronómico de respuesta de cultivos, no se emplearán curvas o funciones de vulnerabilidad. El modelo de respuesta de cultivos al consumo de agua de FAO ha sido ampliamente utilizado en el desarrollo de los programas de riego y en general en la administración de cultivos. La metodología propuesta por este grupo consultor es la única actualmente que utiliza un modelo de esta complejidad en la evaluación probabilista del riesgo de sequía.

4.1 Rendimiento como función del consumo de agua

Con el objetivo de mejorar la eficiencia y la productividad del uso del agua en cultivos, la división de Tierra y Agua de la FAO ha desarrollado una línea de investigación sobre la gestión eficaz del agua en la agricultura de secano e irrigada. El objetivo general es aumentar los ingresos de los agricultores mejorando el rendimiento agrícola, respondiendo a la creciente demanda de alimentos y a los limitados recursos hídricos. El enfoque inicial para modelar la relación entre el rendimiento de los cultivos y el consumo de agua se encuentra publicado en el documento de FAO: *Irrigation and Drainage paper No. 33 Yield response to water* (Doorenbos, Kassam, Bentvelsen, Branscheid, & Plusje, 1979). Este es un enfoque simplificado, en donde la pérdida relativa de rendimiento en cualquier cultivo $\left(1 - \frac{Y}{Y_x}\right)$, se relaciona proporcionalmente a la reducción relativa en el consumo de agua en términos de la evapotranspiración $\left(1 - \frac{ET}{ET_x}\right)$, por medio de un coeficiente de proporcionalidad (K_y), que es específico para cada tipo de cultivo y fase fenológica.

$$\left(1 - \frac{Y}{Y_x}\right) = K_y \left(1 - \frac{ET}{ET_x}\right) \quad \text{Ecuación 2}$$

en donde Y es el rendimiento real, Y_x es el máximo rendimiento, el cual depende de la genética del cultivo y las condiciones climáticas, y se calcula asumiendo que los factores agronómicos (agua, fertilizantes, plagas y enfermedades) no son limitantes. ET es la evapotranspiración real, calculada para condiciones específicas de precipitación y temperatura, y ET_x es la máxima evapotranspiración, calculada asumiendo que los requerimientos de agua del cultivo están totalmente satisfechos.

Este es un enfoque apropiado para propósitos de planificación general y evaluación rápida (Steduto, Hsiao, Fereres, & Raes, 2012b) y puede aplicarse a todos los cultivos agrícolas (herbáceos, árboles y vides), usando el valor apropiado de K_y . Este coeficiente, que es específico de los cultivos y varía a lo largo de la temporada de crecimiento, incluye los procesos biológicos, físicos y químicos involucrados en la producción de biomasa. La Figura 11 muestra la función lineal de producción de agua para el maíz. En términos generales, si $K_y > 1$, se trata de un cultivo muy sensible al estrés hídrico, mientras que si $K_y < 1$, se trata de un cultivo más tolerante al déficit de agua. Adicionalmente, los cultivos en estado vegetativo o de maduración son más resistentes que los cultivos en etapas de floración o de formación de rendimiento.

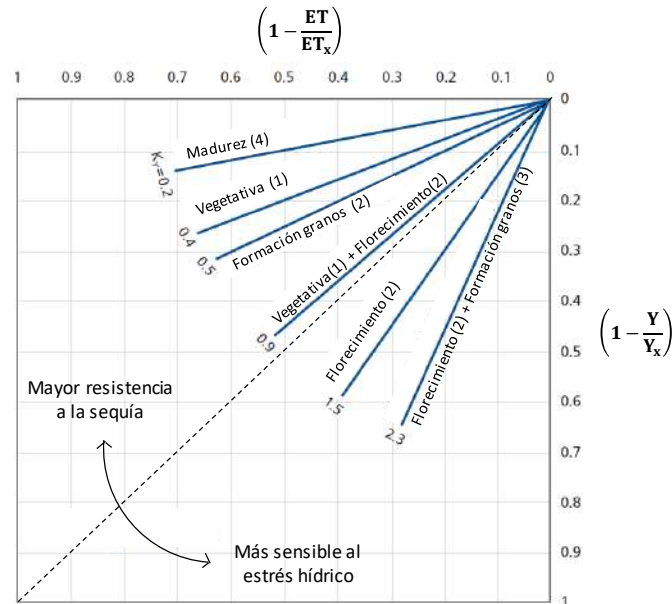


Figura 11. Funciones de agua-rendimiento para el maíz (Adaptado de Steduto et al., 2012, p. 8)

Utilizando la Ecuación 2 como punto de partida, la FAO desarrolló un modelo avanzado de respuesta de rendimiento como función del consumo de agua, el cual se encuentra publicado en el documento *Irrigation and Drainage Paper No. 66 Crop yield response to water* (Steduto et al., 2012b). Este nuevo enfoque permite calcular la biomasa de los cultivos con base en la cantidad de agua transpirada y el rendimiento del cultivo como la proporción de biomasa que entra en las partes cosechables de las plantas. Este modelo ha sido implementado en el software Drought Pro (Bernal et al. 2017) con el fin de facilitar la automatización de los cálculos. Algunas de las características del modelo de la FAO, que son interesantes para la evaluación del riesgo de sequía, son:

- El modelo considera la relación proporcional entre el estrés hídrico y la reducción de la producción de biomasa. En consecuencia, la reducción de la producción de biomasa está relacionada con la reducción de los rendimientos y las pérdidas económicas asociadas con el peligro de sequía.
- El modelo de la FAO incluye el efecto de las anomalías de la humedad del suelo y la respuesta fisiológica de los cultivos al déficit hídrico.
- El modelo calcula la producción de biomasa en una escala de tiempo diaria, para representar mejor la dinámica de la respuesta del cultivo al agua en diferentes etapas de crecimiento. Esta característica es conveniente porque los parámetros meteorológicos, utilizados para calcular el riesgo de sequía, también tienen una escala de tiempo diaria.
- Como la producción de biomasa se calcula a partir de las series de precipitación y temperatura, el modelo puede introducir el efecto de los escenarios de cambio climático. Se incluye también la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera.
- La FAO ha establecido parámetros estándar para los cultivos, con sus correspondientes procedimientos de calibración y validación.
- Es posible incorporar modificadores asociados a prácticas agrícolas (por ejemplo, riego o fertilización), en función de la información disponible.

El modelo de respuesta de cultivos tiene cuatro componentes principales: el clima (en términos de temperatura, precipitación, demanda por evaporación y concentración de dióxido de carbono), los cultivos (procesos de desarrollo, crecimiento y rendimiento), el suelo (balance de agua y sal) y el manejo y administración (prácticas agrícolas). Cada uno de los componentes se explica brevemente a continuación, según lo contenido en Steduto et al. (Steduto et al., 2012b).

4.1.1 Clima

La temperatura influye en el desarrollo de los cultivos y la precipitación es determinante para el balance hídrico del suelo en la zona radicular y el estrés hídrico. Por lo tanto, las principales variables climáticas para el modelo son las temperaturas máximas y mínimas diarias del aire, las precipitaciones diarias totales y la demanda evaporativa de la atmósfera, expresadas como evapotranspiración. Para el caso del modelo de evaluación del riesgo de sequía aplicado en este estudio, todas estas variables climáticas se calculan previamente en la evaluación de la amenaza y se utilizan para calcular los indicadores de sequía.

Adicionalmente, la concentración de dióxido de carbono (CO₂) se incluye en la evaluación, ya que es un aspecto que afecta la expansión del cultivo y la conductancia estomática. Los valores por defecto de las concentraciones anuales de CO₂ se miden en el Observatorio Mauna Loa, en Hawai (www.esrl.noaa.gov/gmd/obop/mlo/). Para el caso de la evaluación prospectiva de riesgo, se utiliza la concentración de dióxido de carbono para el último año disponible en la evaluación base y para la evaluación de los modelos con cambio climático se usan las proyecciones de concentración de dióxido de carbono según el escenario de RCP (trayectoria representativa de concentración) analizada.

Las variables climáticas requeridas por el modelo de vulnerabilidad son series diarias de precipitación, temperatura máxima, media y mínima, evapotranspiración y concentración anual estimada de dióxido de carbono (CO₂) en la atmósfera. Las variables climáticas son el resultado de la simulación estocástica de series meteorológicas.

4.1.2 Cultivo

Los cultivos se modelan en términos de los procesos biológicos, físicos y químicos que determinan su rendimiento. El modelo permite evaluar cómo los cultivos crecen y se desarrollan a lo largo de su ciclo de crecimiento específico, creciendo el follaje, profundizando sus raíces y acumulando biomasa. Todas las etapas fenológicas (o etapas de crecimiento) se consideran en el modelo: vegetativo, floración, formación de rendimiento y maduración, incluyendo etapas fenológicas distintas para cultivos herbáceos o forrajeros.

La fenología se refiere a las etapas de desarrollo de los cultivos y su duración, que se puede definir en días de grado de crecimiento (GDD – *Growing Degree Days*) o días calendario. La cobertura vegetal (CC – *Canopy Cover*) es la representación de la cantidad de follaje, la cual se considera proporcional a la cantidad de agua transpirada y la cantidad de biomasa producida. El subcomponente de profundidad de enraizamiento modela el proceso en el cual las raíces se profundizan a una tasa relativa constante mientras que la planta está creciendo hasta la fase de formación de rendimiento. El modelo puede incluir los efectos de capas de suelo o nivel freático superficial que restringen de crecimiento de las raíces.

En la Figura 12 se muestran las curvas de la cobertura vegetal y profundidad de la raíz. La curva en la parte superior representa el desarrollo de la cobertura vegetal a partir de la expansión (CGC: coeficiente de crecimiento vegetal – *Canopy Growth Coefficient*) y la disminución (CDC: coeficiente de disminución vegetal – *Canopy Decline Coefficient*). La cobertura vegetal se expresa como una fracción de suelo sombreado por las hojas o partes aéreas de las plantas, siendo su nivel máximo (CC_x) específico del cultivo. La segunda curva representa la profundidad de enraizamiento efectiva, desde su valor mínimo (Z_n) en el momento de la siembra hasta su valor máximo (Z_x) en la fecha que se alcanza la madurez del cultivo. Este conjunto de curvas representa el desarrollo del cultivo y su interacción con los sistemas de suelo y aire.

El modelo permite calcular la transpiración de los cultivos separadamente de la evaporación del suelo. El subcomponente de transpiración de cultivos determina el uso de agua de la planta cuando no hay estrés que limite la apertura estomática, característica que es específica del tipo de cultivo y cambia durante su desarrollo. La evaporación del suelo considera la pérdida de agua de la superficie del suelo húmedo no sombreado por la vegetación. Los dos últimos subcomponentes, producción de biomasa y rendimiento cosechable, se pueden resumir en las ecuaciones 3 y 4.

La producción de biomasa se define como:

$$B = WP * \sum Tr \quad \text{Ecuación 3}$$

en donde B es la biomasa producida acumulada, Tr es la transpiración del cultivo sumada durante el período de producción de la biomasa y WP es el parámetro de productividad del agua medido como la cantidad de biomasa seca (kilogramos) por unidad de área (m²) y de agua transpirada (mm). La robustez del modelo depende de la naturaleza conservadora del WP que permanece constante en un rango de ambientes, cuando se normaliza para demandas evaporativas.

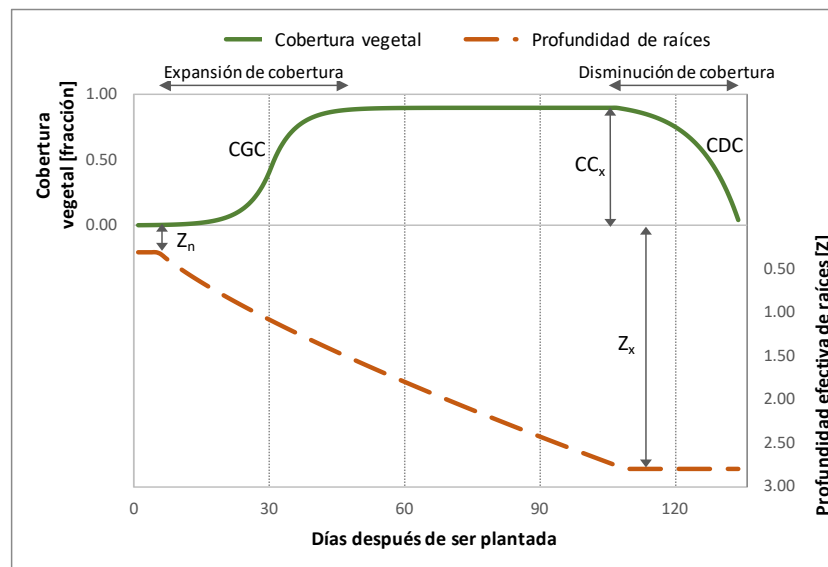


Figura 12. Representación esquemática del desarrollo en el tiempo de la cobertura vegetal y la profundidad de enraizamiento (Adaptado de Steduto et al., 2012, p. 23)

Finalmente, se utiliza un índice de cosecha HI para estimar el rendimiento Y de la biomasa producida B . Al hacer esta distinción entre la biomasa y el rendimiento, se pueden evaluar por separado los efectos de las condiciones climáticas sobre la producción de biomasa y la cosecha.

$$Y = HI * B$$

Ecuación 4

La Figura 13 muestra la función del cambio del índice de cosecha HI en el tiempo para cultivos de frutas o granos, para el período de formación del rendimiento (fase de floración hasta la madurez fisiológica). HI comienza a partir de cero, en un crecimiento lento pero acelerado seguido por una tasa de aumento constante hasta que se alcanza el rango superior HI_o . Este nivel superior es el índice de cosecha de los cultivos en condiciones óptimas, es específico del tipo de cultivo y se dispone de datos para su calibración.

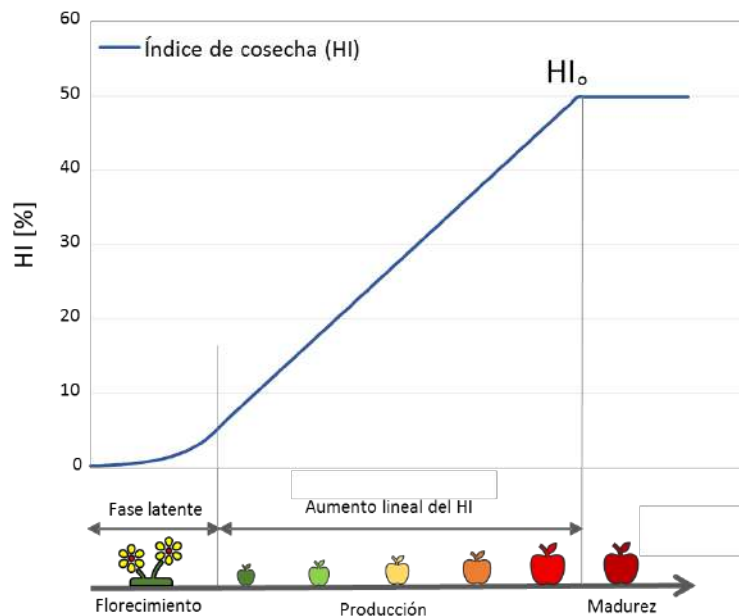


Figura 13. Representación esquemática del cambio en el tiempo del índice de cosecha (HI) para cultivos de frutas o granos (Adaptado de Steduto et al., 2012, p. 27)

La información de entrada también incluye las variables necesarias para parametrizar cada tipo de cultivo, según los requerimientos del modelo de AquaCrop. Esta información ingresa al modelo en archivos de texto plano, uno para cada tipo de cultivo, manteniendo el orden de la lista de los parámetros. A continuación, se presenta una descripción detallada de los diferentes parámetros y sus unidades. También se incluyen valores por defecto para aquellos parámetros que son independientes del tipo de cultivo o suelo. Para más información sobre los parámetros que utiliza Aquacrop se recomienda consultar el manual de usuario y artículos publicados por los autores del modelo (Allen et al., 1998; FAO, 2017; Raes et al., 2017; Raes et al., 2011; Steduto et al., 2012).

Los parámetros de los cultivos utilizados en el modelo de respuesta al agua se clasifican como parámetros conservativos y parámetros no conservativos, como se explica a continuación.

4.1.2.1 Parámetros conservativos

Son aquellos que no sufren variaciones considerables en el tiempo, bajo diferentes condiciones de manejo, por ubicación geográfica o clima. Se supone que no cambian entre tipo de cultivos. Algunos de estos parámetros incluyen los umbrales de estrés y productividad hídrica normalizada de biomasa.

En la Tabla 14 se muestra la lista de parámetros conservativos que definen las condiciones iniciales del modelo de AquaCrop. Para este estudio el modelo de respuesta del cultivo al agua se limita a evaluar condiciones de estrés hídrico (falta de agua en el desarrollo de la planta, y no incluye procesos de estrés por fertilidad o salinidad del suelo). Es por esta razón que los parámetros asociados a la respuesta del cultivo a fertilidad y salinidad del suelo no se consideran en este estudio y el campo de estos parámetros se establece en 25 y -9, respectivamente, para que el modelo reconozca que no se incluyen estas evaluaciones en el momento de ejecutar el análisis. Los demás parámetros incluidos en esta tabla indican al modelo qué tipo de cultivo está evaluando y si la unidad de tiempo del análisis está en términos de días calendario o grados de crecimiento.

En cuanto al tipo de cultivo, se considera que:

- Vegetales de hoja: no se considera la etapa de florecimiento. Incluye cultivos como espinaca o lechuga. En esta categoría se incluyen las pasturas naturales y mejorados.
- Frutales/Granos: Si cuentan con una etapa de florecimiento. Incluye cultivos como el maíz o cítricos.
- Tubérculos y raíces: se considera un periodo de formación de la raíz o tubérculo. Incluye cultivos como la papa.

Tabla 14. Parámetros que definen el modelo de AquaCrop.

Variable	Descripción	Valor
Tipo del cultivo	1: Vegetales de hoja 2: Frutales/Granos 3: Tubérculos y raíces	
Determinación del ciclo de crecimiento	0: Grados crecimiento GDD 1: Días calendario	
Método de siembra	0: Trasplante 1: Siembra directa	
Respuesta de la expansión de la cobertura Respuesta de la expansión máxima de la cobertura Respuesta de la productividad hídrica Respuesta del declive de la cobertura Respuesta del cierre de estomas	Aplica para modelación de la fertilidad del suelo	25 (Si no se considera)
Conductividad eléctrica del suelo en la que el cultivo empieza a afectarse Conductividad eléctrica del suelo en la que el cultivo detiene su desarrollo	Aplica para modelación de la salinidad del suelo	-9 (Si no se considera)

La Tabla 15 muestra otro conjunto de parámetros que son independientes del tipo de cultivo o método de siembra. Para todos estos parámetros se presentan los valores adoptados por defecto que se aplican en

este estudio, según las recomendaciones publicadas por los autores del modelo de AquaCrop, por la FAO e investigadores (Allen et al., 1998; Raes, et al., 2017; FAO, 2018; Monfreda et al., 2008).

Tabla 15. Parámetros conservativos de cultivos considerados en este estudio

Variable	Descripción	Valor
Disminución de factores de agua en suelo se ajusta por ETo	1: Ajuste por ETo	1
Acumulado de ETo durante periodo de estrés a ser excedido antes que se dispare la senescencia	0: No se considera	0
Estrés por fertilidad del suelo considerado para la calibración	Porcentaje [0,100]	50
Máxima extracción de agua en el cuarto superior de la zona radicular	m3/m3/día	0.048
Máxima extracción de agua en el cuarto inferior de la zona radicular	m3/m3/día	0.012
Máxima disminución de CGC entre estaciones	-9: No aplica	-9
Número de estaciones en el que se alcanza la máxima disminución de CGC	-9: No aplica	-9
Factor de forma para la disminución del CGC	-9: No aplica	-9
Productividad hídrica normalizada por ETo y CO2 durante formación de cosecha	Porcentaje [0,100]	100
Desempeño del cultivo bajo concentraciones elevadas de CO2	Porcentaje [0,100]	frijol: 90 50
Distorsión de la cobertura por estrés debido a salinidad del suelo	Rango: 0: ninguno a 100: muy fuerte	25
Respuesta calibrada del estrés de estomas por salinidad del suelo	Rango: 0: ninguno a 200: extremo	100

Los valores asignados a los parámetros conservativos del cultivo son aquellos que los autores de la metodología de la FAO recomiendan y se consideran los valores de referencia para aplicar la metodología. Estos son valores que han demostrado buenos resultados en múltiples evaluaciones en el mundo al calibrar los resultados del modelo con mediciones en campo.

4.1.2.2 Parámetros específicos y no conservativos

Son aquellos que requieren un ajuste según tipo de cultivo o condiciones ambientales diferentes a los definidos en la calibración. Estos son los parámetros que se deben conocer para conformar la base de datos de cultivos que mejor se ajusta a las condiciones del área de estudio. Ahora bien, no siempre es posible encontrar información oficial o de fuentes confiables que reporten valores tan específicos, por lo que en caso de no encontrar información específica de cultivos y su adaptación a las condiciones de suelo y ambientales de la región, se hará uso de parámetros reportados en la literatura y publicados por la FAO (Ver <http://www.fao.org/land-water/databases-and-software/crop-information/en/>).

La Tabla 16 muestra los parámetros específicos del cultivo agrupados por categorías: parámetros afectados por el método de siembra, parámetros fenológicos o parámetros afectados por las condiciones del suelo. Estos mismos parámetros se presentan de forma esquemática en la Figura 14, en un diagrama que representa la curva del crecimiento en el tiempo, de la cobertura verde de la planta (zona verde) y del sistema radicular (zona anaranjada). En este diagrama se señalan los tiempos para alcanzar cada una de las etapas fenológicas medidas desde el momento de la siembra. También se señalan los valores de crecimiento máximo potencial de la cobertura (CCx) y la profundidad máxima potencial que pueden alcanzar las raíces (Zx). Otros parámetros específicos del tipo de cultivo se presentan en la Tabla 17.

Tabla 16. Parámetros específicos del cultivo por categoría

Parámetros afectados por método de siembra y manejo	Método de siembra: Siembra directa o trasplante.
	Densidad de plantas: determina la cobertura inicial (CC ₀) y máxima (CC _x)

	Tiempo para alcanzar el 90% de germinación.
Fenología de cultivos	Tiempo para alcanzar la cobertura máxima (CC_x)
	Tiempo para inicial senescencia
	Tiempo para alcanzar la madurez fisiológica
	Tiempo para el inicio de floración/formación de cosecha
	Duración de la floración
Parámetros afectados por las condiciones del suelo	Profundidad máxima efectiva de zona radicular (Z_x)
	Tasa de profundización de raíces o tiempo para alcanzar profundidad máxima (Z_x)

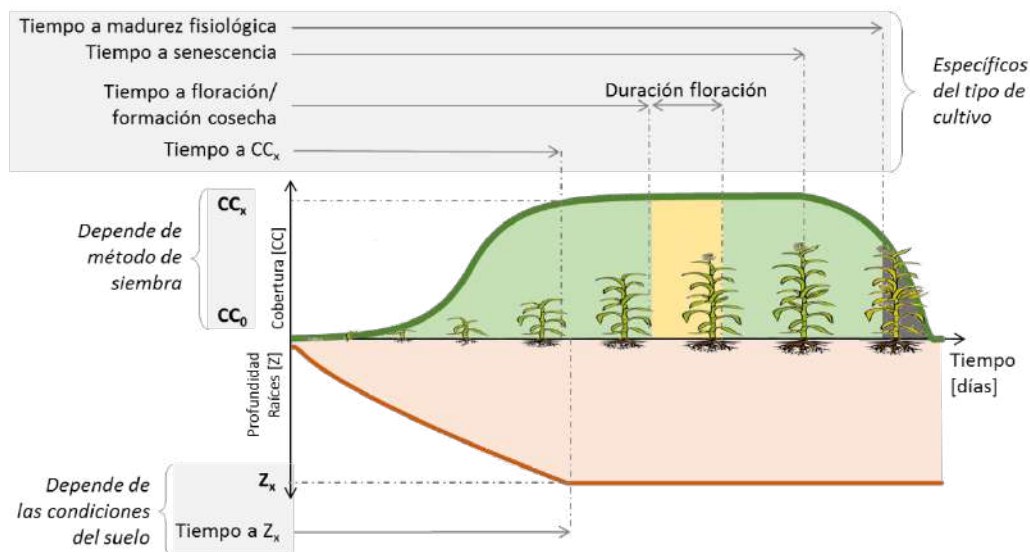


Figura 14. Parámetros de cultivos que dependen del tipo de planta y condiciones ambientales (FAO, 2017)

Tabla 17. Parámetros específicos según tipo de cultivo

Símbolo	Variable	Descripción
	Producción del cultivo asociada a floración	0: No asociado 1: Asociado
Tbase Tupper GDD_lo	Temperatura base, por debajo no crece el cultivo (estrés frío) Temperatura máxima, por encima no crece el cultivo (estrés calor) Mínimos grados de crecimiento para transpiración completa	en °C en °C en GDD (grado crecimiento)
Do Ao CCx	Plantas por hectárea Superficie de suelo cubierta por una planta a 90% de germinación Cobertura verde máxima	# plantas/ha cm²/ha fracción [0,1]
dT.GDD d.germinación d.flor d.flores d.sen d.mad d.Zx	Duración del ciclo de crecimiento completo Tiempo desde siembra hasta germinación Tiempo desde siembra hasta floración Duración de etapa de floración Tiempo desde siembra hasta inicio de senescencia Tiempo desde siembra hasta madurez Tiempo desde siembra hasta máxima profundidad radicular	en GDD (grado crecimiento) -9: Si modelo usa días calendario En # días calendario o GDD (grado crecimiento) -1: Cultivos permanentes
Zn Zx	Profundidad de raíces mínima efectiva Profundidad de raíces máxima efectiva	en metros en metros
n	Factor de forma para el crecimiento radicular	[-]
Kcbx CGC	Coefficiente del cultivo Factor de disminución de coeficiente del cultivo, como resultado de edad, deficiencia de nitrógeno, etc. Coeficiente de crecimiento de la cobertura	Sin unidades # %/día 0.15 o 0.3 En # días calendario o GDD (grado crecimiento)

Símbolo	Variable	Descripción
CDC	Coeficiente de decrecimiento de la cobertura	En # días calendario o GDD (grado crecimiento)
H _{lo}	Índice de Cosecha de referencia	Porcentaje [0,100]
dHI	Aumento potencial del Índice de cosecha	Porcentaje [0,100] -9: No aplica
p exp,upper	Factor de disminución de agua en suelo para expansión de la cobertura	Umbral superior fracción [0,1]
p exp,lower	Factor de disminución de agua en suelo para expansión de la cobertura	Umbral inferior fracción [0,1]
Ks exp,w	Factor de forma para coeficiente de estrés hídrico por expansión de la cobertura	> 0; 3 si no hay datos si =0 línea recta
p sto	Factor de disminución de agua en suelo para control de estomas	Umbral superior fracción [0,1]
Ks sto	Factor de forma para coeficiente de estrés hídrico por control de estomas	> 0; 3 si no hay datos si =0 línea recta
p sen	Factor de disminución de agua en suelo para senescencia de la cobertura	Umbral superior fracción [0,1]
Ks sen	Factor de forma para coeficiente de estrés hídrico por senescencia de cobertura	> 0; 3 si no hay datos si =0 línea recta
p pol	Factor de disminución de agua en suelo por polinización	Umbral superior fracción [0,1]
	Punto anaerobio en el cual ocurre aireación deficiente	%Vol 0: Arroz 5: Otros cultivos tolerantes a encharcamiento
f cc	Efecto de la cobertura en la reducción de evaporación del suelo en la etapa final	Porcentaje [0,100]
d.cos	Exceso de frutas potenciales Tiempo desde floración hasta alcanzar el índice de cosecha	Porcentaje [0,100] # días g/m2
WP*	Productividad hídrica normalizada por ET _o y CO ₂	Cultivo tipo C3: entre 13 y 18 C4: entre 28 y 33
f yield	Coeficiente que describe el impacto positivo en HI por cierre de estomas durante la formación de la cosecha Coeficiente que describe el impacto negativo en HI por cierre de estomas durante la formación de la cosecha Incremento máximo permitido de in HI especificado	[-] -9: No aplica [-] -9: No aplica Porcentaje [0,100] -9: No aplica

Los valores de los parámetros no conservativos se determinan a partir de estudios en campo, en los que se evalúan las condiciones de crecimiento de la planta bajo diferentes escenarios de disponibilidad hídrica. Este tipo de ensayos en campo están por fuera del alcance de este proyecto. Por esta razón, para la evaluación de pérdidas en el sector agrícola de los municipios seleccionados en Colombia, se utilizan parámetros calibrados y validados por fuentes externas. Algunas fuentes de información consultadas son:

- FAO: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación: Es la organización que fomenta el uso de AquaCrop para evaluar el impacto del ambiente y la gestión de cultivos en la producción de alimentos. Esta organización publica parámetros de diferentes cultivos que han sido previamente utilizados en modelos de AquaCrop en el mundo. Para más información consultar: <http://www.fao.org/land-water/databases-and-software/crop-information/en/>
- Manual de Usuario AquaCrop (Steduto et al., 2012): En las Secciones 3.4 y 4.1 de este manual se presentan valores de cultivos parametrizados que han sido usados previamente en modelos de AquaCrop.
- Artículos académicos publicados en revistas especializadas y tesis de investigación (Monfreda et al., 2008; Poppe, 2016).
- Uso del modelo AquaCrop para estimar rendimientos para el cultivo de maíz en los departamentos de Córdoba, Meta, Tolima y Valle del Cauca (Bello et al., 2013).

4.1.3 Suelo

El componente de suelo incluye su perfil en profundidad y las características del nivel freático dentro del sistema radicular de la planta, expresando la región radicular como un volumen de control en donde se estiman los balances de agua y sal. El suelo puede ser subdividido en capas de profundidad variable, cada una con diferentes características físicas como el contenido de agua en el suelo saturado, el límite superior de agua contenida o capacidad de campo (FC – *Field Capacity*), el punto de marchitamiento permanente (PWP – *Permanent Wilting Point*) o límite inferior del nivel de agua, y la conductividad hidráulica del suelo saturado (Ksat). Estos valores son las entradas para determinar la evaporación del suelo, el drenaje interno, la percolación profunda, el escurrimiento superficial y la capilaridad. El nivel freático debe caracterizarse en términos de su profundidad y salinidad.

La Figura 15 muestra una representación simplificada del modelo del sistema radicular, donde D_r representa el agotamiento de la raíz y W_r es la profundidad equivalente del agua. El agua disponible total (TAW – *Total Available Water*) es la cantidad de agua retenida en la zona de raíces entre la capacidad de campo (límite superior) y el punto de marchitamiento permanente (límite inferior).

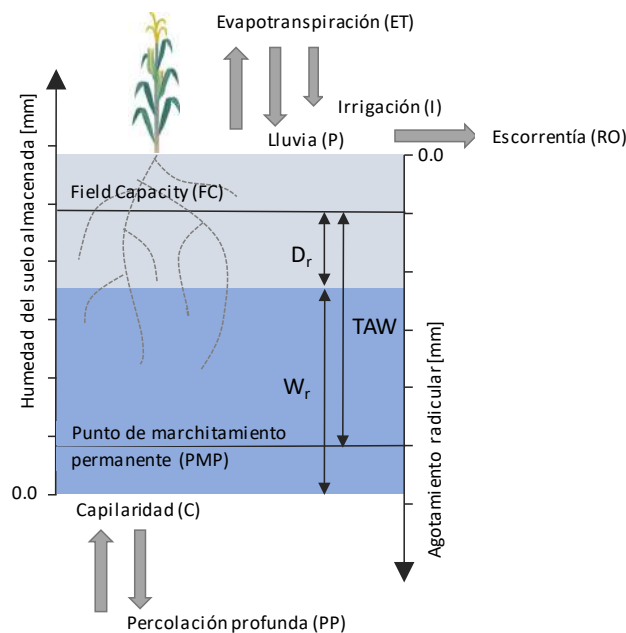


Figura 15. Representación esquemática del volumen de control de la zona radicular (Adaptado de Steduto et al., 2012, p. 28)

El balance hídrico dentro de la zona radicular se calcula día a día, y para cualquier momento del desarrollo del cultivo. Los caudales de agua entrantes considerados en el modelo son provistos por las lluvias, el riego y la capilaridad. Por otro lado, los flujos de agua salientes considerados en el modelo son el escurrimiento, la evapotranspiración y la percolación profunda.

La información de entrada al modelo de vulnerabilidad de cultivos incluye las variables necesarias para parametrizar el suelo, que sirve de soporte para el crecimiento de las plantas. El modelo que se aplica en este estudio toma un volumen de referencia del suelo, en la que se ubica la zona radicular, y estima su balance hídrico para determinar la cantidad de agua que tiene disponible la planta. Con esto se evalúan

las interacciones suelo-planta-atmósfera que permiten modelar el crecimiento de cultivos y su rendimiento. La información requerida incluye el tipo de suelo, textura, perfil en profundidad y nivel freático. Para el cálculo de la escorrentía se calcula el número de curva a partir de la información de uso y tipo de suelo. Este procedimiento se muestra de forma esquemática en la Figura 16, en la que también se indica el tipo de información de entrada y los resultados.

El modelo de respuesta de cultivos al agua para Colombia es un modelo a escala nacional. Al ser una resolución de trabajo gruesa, en el modelo de vulnerabilidad no se incluyen parámetros de afectación local como presencia de múltiples horizontes de suelo o variaciones en el nivel freático. En el caso del perfil de suelo se supone un perfil homogéneo para la profundidad máxima que alcanzan las raíces según cultivo, no se considera la presencia de barreras físicas que limiten la profundización de las raíces.

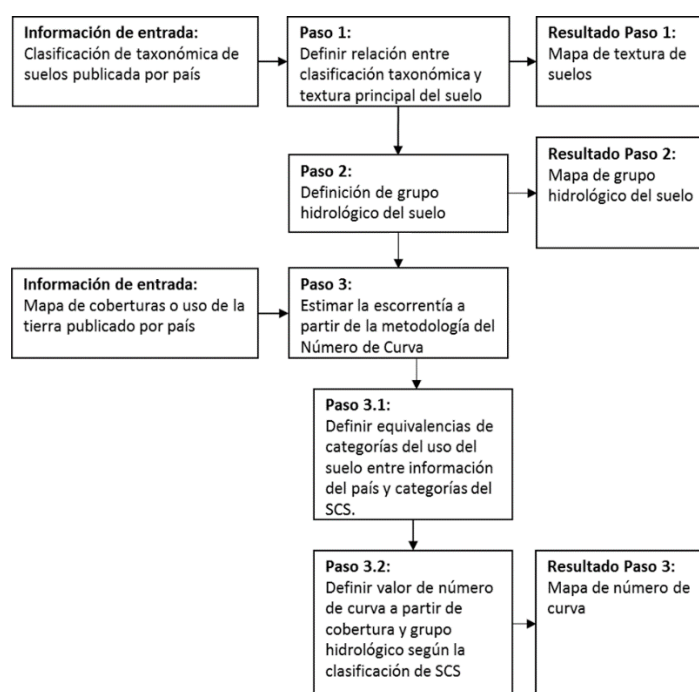


Figura 16. Metodología aplicada para determinar características del suelo.

4.1.3.1 Almacenamiento y disponibilidad de agua en el suelo

Los parámetros necesarios para estimar la capacidad de suelo de almacenar y retener agua se muestran en la Figura 17. Dependiendo del nivel del agua en el suelo se define la disponibilidad del agua para la planta. Es así como después de una lluvia, el agua puede quedar en exceso de la cual una fracción se convierte en escorrentía y la otra fracción se infiltra por fuerzas gravitacionales. Esta agua infiltrada pasa de un nivel de saturación (en el cual no hay contenido de aire en el suelo) al nivel que tiene el suelo de retener el agua o capacidad de campo (Field capacity en inglés). A medida que el agua se infiltra en el suelo, las plantas pierden la posibilidad de usar el agua, hasta llegar al punto de marchitamiento definitivo, en el que la planta no cuenta con agua disponible y no se puede recuperar. El rango de agua disponible para la planta se ubica entre la capacidad de campo y el punto de marchitamiento, en el que el suelo es capaz de retener el agua. Entonces el modelo de vulnerabilidad evalúa si el contenido de agua en el suelo

se ubica dentro del rango de agua disponible que tiene la planta y ajusta el desarrollo del cultivo según las condiciones de estrés hídrico que sufra.

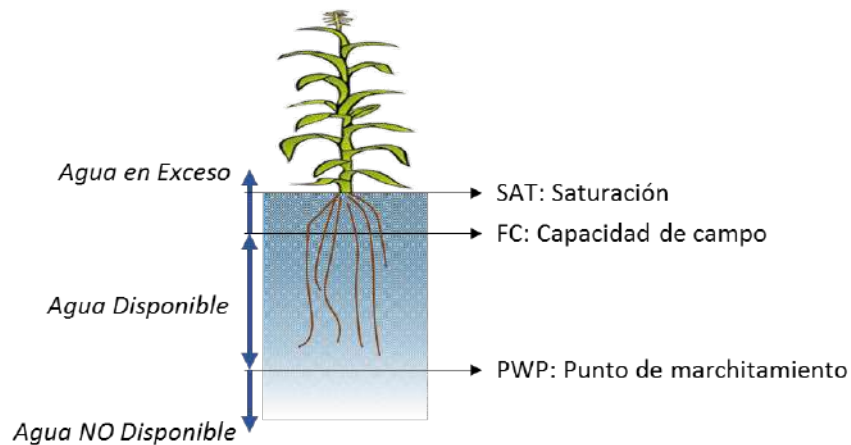


Figura 17. Esquema de la disponibilidad del agua en el suelo

La capacidad de retener el agua en el suelo depende en gran medida de su textura. Como el suelo es un medio poroso, dependiendo del tamaño de los espacios entre partículas, el suelo está en capacidad de almacenar más o menos agua. El tamaño de las partículas del suelo, o textura se define según su contenido de arena, limo y arcilla. Es así como suelos arenosos tienen poca capacidad de retener agua por su estructura de partículas gruesas con macroporos¹. De otro lado suelos de partículas finas retienen el agua en microporos y tienen una mayor capacidad de campo (Sheppard & Hoyle, 2018). Esta relación se puede ver de forma esquemática en la Figura 18, en la que se presenta el porcentaje de volumen de agua para la capacidad de campo según la textura de suelo, desde arenas con partículas gruesas hasta arcilla de partículas finas. En la figura se puede ver como la capacidad campo o de retener agua en el suelo aumenta a medida que las partículas de suelo son más finas. Sin embargo, para que el agua sea disponible para las plantas, el contenido de agua en el suelo debe mantenerse sobre el punto de marchitamiento. Como se ve en la figura, el punto de marchitamiento también aumenta en la medida que la textura del suelo es más fina. Esto se debe a que, aunque hay mayor volumen de agua retenida del suelo fino, la fuerza que se ejerce para mantener el agua en los microporos es muy alta y las plantas no tienen capacidad de succionarla. Entonces, para propósitos agrícolas es preferible cultivar en suelos de textura media, tipo francos o franco limosos, que tienen una alta disponibilidad de agua para las plantas.

¹ Se entiende como poro el espacio entre partículas de suelo. En suelos de partículas gruesas como las arenas, los poros son de mayor tamaño que en suelos de partículas finas como las arcillas.

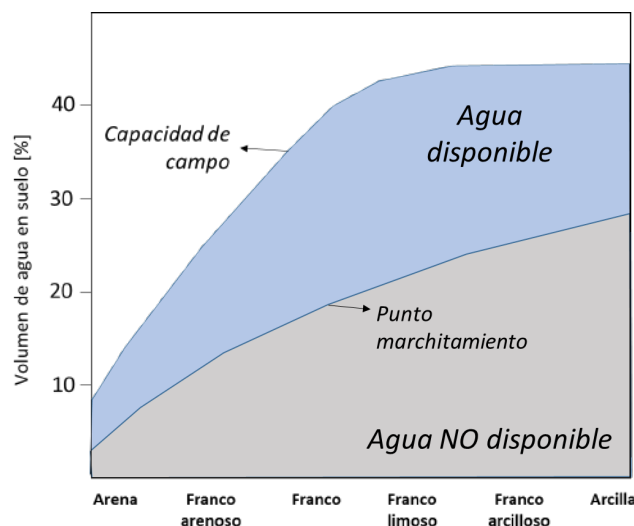


Figura 18. Esquema de retención de agua según tipo de suelo (Sheppard & Hoyle, 2018)

Los valores de contenido volumétrico de agua en suelo para condiciones de saturación, capacidad de campo y punto de marchitamiento se determinan a partir de evaluaciones locales. El modelo AquaCrop suministra valores por defecto para estos parámetros, en caso de no contar con información del área de interés (Raes et al., 2011). Estos valores se utilizan en este estudio y se presentan en la Tabla 18.

Tabla 18. Valores de parámetros de contenido volumétrico de agua por defecto en el modelo AquaCrop

Tipo suelo	SAT [%vol]	FC [%vol]	PWP [%vol]
arena	36	13	6
arenoso franco	38	16	8
franco arenoso	41	22	10
franco	46	31	15
franco limoso	46	33	13
limoso	43	33	9
franco arcillo arenoso	47	32	20
franco arcilloso	50	39	23
franco arcillo limoso	52	44	23
arcillo arenoso	50	39	27
arcillo limoso	54	50	32
arcilla	55	54	39
impermeable	0.5	0.3	0.1

La determinación de la textura del suelo se hace a partir de las fracciones de arcilla, limo y arenas que lo compongan. Esta clasificación por tipo que se muestra en la tabla anterior se obtiene a partir del triángulo de clase textural del suelo, publicado por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, USDA por sus siglas en inglés. Este esquema se presenta en la Figura 19.

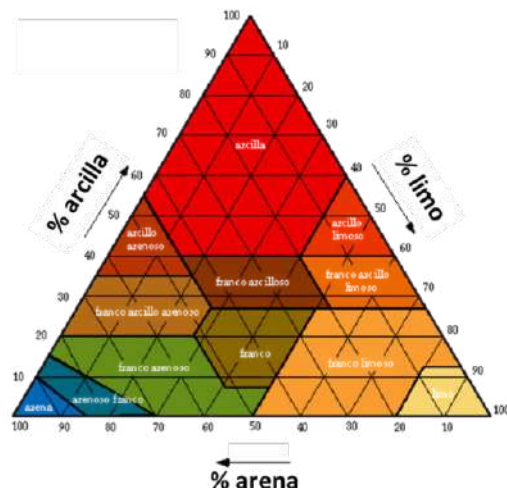


Figura 19. Triángulo de clases texturales básicas de suelos según el tamaño de partículas. Elaborado por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA).

4.1.3.2 Estimación de la escurrentía

Dentro del balance hídrico en el volumen de control del suelo se debe considerar tanto los flujos de entrada (precipitación, irrigación, capilaridad) como los flujos de salida (escurrentía, evapotranspiración y percolación profunda), y con esto estimar la cantidad de agua almacenada y disponible para la planta. Para calcular el caudal de escurrentía se requiere asignar valores a la conductividad hidráulica saturada y el número de curva (o factor de escurrimiento) definido por el Soil Conservation Service de los Estados Unidos, que es la metodología seleccionada para determinar los volúmenes de escurrentía.

La conductividad hidráulica saturada (K_{sat}) determina el drenaje interno del perfil de suelo, las pérdidas por percolación profunda y la cantidad de agua infiltrada en la zona radicular, y la escurrentía superficial después de la lluvia (Raes et al., 2011). En caso de no contar con información detallada del área de análisis, el modelo AquaCrop suministra valores por defecto de la conductividad hidráulica saturada para cada tipo de textura de suelo, estos valores recomendados se muestran en la Tabla 19.

Tabla 19. Valores de parámetros hidrológicos del suelo por defecto en el modelo AquaCrop (Raes et al., 2011)

Tipo suelo	K_{sat} [mm/d]	Grupo hidrológico
arena	3000	A
arenoso franco	2200	A
franco arenoso	1200	A
franco	500	B
franco limoso	575	B
limoso	500	B
franco arcillo arenoso	225	C
franco arcilloso	125	C
franco arcillo limoso	150	C
arcillo arenoso	35	D
arcillo limoso	100	D
arcilla	35	D
impermeable	0	D

En esta tabla también se presenta el grupo hidrológico del suelo que indica la capacidad de infiltración del suelo. Más información sobre cada grupo hidrológico del suelo se presenta en la Tabla 20.

Tabla 20. Capacidad de infiltración según grupo hidrológico del suelo (Fuente: Soil Conservation Service, 1986, Raes et al., 2011)

Grupo hidrológico del suelo	Infiltración cuando están muy húmedos	Características
A	Rápida	Alta capacidad de infiltración > 76 mm/h
B	Moderada	Capacidad de infiltración 76-38 mm/h
C	Lenta	Capacidad de infiltración 36-13 mm/h
D	Muy Lenta	Capacidad de infiltración < 13 mm/h

El factor de escurrimiento o número de curva es un indicador global de la cantidad de agua que será absorbida o transpirada por los suelos superficiales. Se obtiene como función del uso de la tierra, la cobertura vegetal y las condiciones de infiltración y transpiración del suelo superficial. La metodología del US Soil Conservation Service consiste en calcular el agua perdida por escorrentía (RO) a partir de la precipitación (P) y el agua que se alcanza a infiltrar antes que ocurra el escurrimiento (I_a). Eso se hace a partir del potencial máximo que tiene el suelo de retención de agua (S) que se calcula en función del número de curva (CN). Siguiendo las ecuaciones 5 y 6 se procede a calcular la escorrentía:

$$RO = \frac{[P - I_a]^2}{P + S - I_a} \quad \text{Ecuación 5}$$

$$S = 254 \left(\frac{100}{CN} - 1 \right) \quad \text{Ecuación 6}$$

Según recomendaciones de los autores de AquaCrop (Raes et al., 2017), se considera que $I_a = 0.05S$. Esta condición está implementada en el modelo por defecto.

4.1.3.3 Parámetros conservativos empleados en la modelación

Los parámetros conservativos son aquellos que no sufren variaciones considerables en el tiempo, bajo diferentes condiciones de manejo, por ubicación geográfica o clima. Se supone que no cambian entre tipo de suelos. En la Tabla 21 se muestra la lista de parámetros conservativos que definen las propiedades del suelo para el modelo de AquaCrop. Se presentan los valores por defecto utilizados en el caso de no tener información más detallada para incluir en el modelo.

Tabla 21. Parámetros para el suelo que definen el modelo de AquaCrop.

Campo	Descripción	Valor por defecto	Unidad
EvapZsurf	Espesor de la capa evaporativa del suelo superficial que está en contacto directo con la atmósfera (m)	0.04	[m]
EvapZmin	Mínimo espesor de la capa evaporativa completa del suelo	0.15	[m]
EvapZmax	Máximo espesor de la capa evaporativa completa del suelo	0.3	[m]
Kex	Coefficiente de evaporación máxima del suelo	1.1	[-]
fevap	Factor de forma que describe la reducción en la evaporación con la disminución del contenido de agua en la capa superficial del suelo	4	[-]

Campo	Descripción	Valor por defecto	Unidad
fWrelExp	Contenido relativo de agua en la capa superficial del suelo en la cual la profundidad de la capa evaporativa se expande	0.4	[-]
fwcc	Coeficiente que representa la reducción de la evaporación en el suelo por el efecto de protección de las hojas secas caídas	50	[-]
AdjREW	Define si el valor de REW (agua evaporable) se define por el usuario	0	[-]
REW	Valor definido por el usuario de agua evaporable (solo se usa si AdjREW es 1	0	[mm]
AdjCN	Define si el valor de número de curva (CN) se ajusta diariamente según las condiciones de humedad del suelo.	1	[-]
zCN	Espesor de la capa de suelo que se usa para calcular el contenido de humedad del suelo para ajustar el CN	0.3	[m]
zGerm	Espesor de la capa de suelo que se usa para calcular el contenido de humedad del suelo y determinar si puede ocurrir la germinación.	0.3	[m]
zRes	Profundidad de una capa restrictiva del suelo que pueda inhibir el crecimiento de las raíces.	-999	[-]
fshapecr	Factor de forma que describe el efecto de nivel freático superficial en el contenido de agua	16	[-]
Thickness	Usamos un espesor estándar para todos los tipos de suelo	3	[m]
NumComp	Número de compartimientos en lo que se divide el espesor total del suelo para hacer cálculos de flujo de agua	10	[-]

Criterios de selección del parámetro por defecto:

1. Estos parámetros han sido calibrados en estudios previos que utilizan la metodología de la FAO de respuesta de cultivos al agua implementada en el programa AquaCrop. Una lista amplia de estos estudios en los que se ha aplicado la metodología de AquaCrop puede ser consultada en la siguiente página web:

<http://www.fao.org/aquacrop/applications/es/>.

2. Para el alcance de este estudio se considera que el valor de volumen de agua evaporable no está disponible para ser incluido en el modelo, por lo que los valores asignados a estos parámetros (AdjREW y REW) son igual a cero, para evitar que el usuario deba ingresar un valor. La metodología de la FAO incluye otras formas de calcular estos parámetros a partir de la información ingresada por el usuario y no afecta el resultado final del modelo (Para detalles de esta metodología consultar el manual de cálculo de AquaCrop (Raes et al., 2017)).

3. Para el objetivo de este estudio se trabaja en escala nacional. Por ser una resolución gruesa, no es posible incluir parámetros medidos en campo en lo que se refiere a posibles capas restrictivas de suelo que impidan el crecimiento de las raíces o diferencias entre espesor de la capa de suelo. Estos valores se usan para aplicaciones locales en cultivos pequeños en los que se puedan hacer estudios detallados para conocer las condiciones locales del suelo. La medida de espesor de suelo se definió constante en el marco de este estudio.

4.1.3.4 Parámetros específicos y no conservativos empleados en la modelación

Estos parámetros son aquellos que requieren un ajuste según tipo de suelo, que en el marco de este estudio está asociado a la textura de la capa principal. La Tabla 22 muestra la lista de parámetros que son específicos según el tipo de suelo y su uso.

Tabla 22. Parámetros no conservativos del suelo que definen el modelo de AquaCrop.

Campo	Descripción	Valor por defecto	Unidad
CN	Número de curva	El valor de CN se toma según el mapa por país.	[-]
SAT	Contenido de agua en suelo saturado	Ver Tabla 4-19	[%vol]
FC	Contenido de agua en suelo a capacidad de campo		[%vol]
PWP	Contenido de agua en suelo en punto de marchitamiento		[%vol]
Ksat	Conductividad hidráulica en saturación		[mm/d]
Textura	Descripción del suelo - nombre		[-]
TXT	Código de textura		[-]
InitialWC	Contenido inicial del suelo	Se supone que el suelo está en capacidad de campo	[-]

La Tabla 23 muestra la relación entre el tipo de textura con los parámetros específicos del suelo en relación con el almacenamiento de agua en el suelo y su disponibilidad para las plantas. La categoría *impermeable* hace referencia a zonas urbanas y la categoría *agua* hace referencia a cuerpos de agua tipo lagos o reservorios.

Tabla 23. Relación textura del suelo con parámetros de contenido de agua y grupo hidrológico.

Textura	TXT	SAT [%vol]	FC [%vol]	PWP [%vol]	TAW [%vol]	Ksat [mm/d]	Grupo
Arena	0	36	13	6	70	3000	A
Arenoso franco	1	38	16	8	80	2200	A
Franco arenoso	2	41	22	10	120	1200	A
Franco	3	46	31	15	160	500	B
Franco limoso	4	46	33	13	200	575	B
Limoso	5	43	33	9	240	500	B
Franco arcillo arenoso	6	47	32	20	120	225	C
Franco arcilloso	7	50	39	23	160	125	C
Franco arcillo limoso	8	52	44	23	210	150	C
Arcillo arenoso	9	50	39	27	120	35	D
Arcillo limoso	10	54	50	32	180	100	D
Arcilla	11	55	54	39	150	35	D
Impermeable	12	0.5	0.3	0.1	2	0	D
Agua	-1	0.5	0.3	0.1	2	0	D

4.2 La dinámica de la respuesta de los cultivos al estrés hídrico

Las condiciones de estrés hídrico son representadas por un coeficiente de estrés (K_s) y un umbral para los indicadores de estrés. K_s es un modificador que cuantifica la intensidad del efecto que produce el estrés hídrico en los procesos de crecimiento específicos para un cultivo y etapa de crecimiento. Como se observa

en la Figura 20, los valores de K_s varían entre 0 (estrés total) y 1 (sin estrés), siguiendo una función lineal o convexa (el grado de curvatura se establece durante la calibración del modelo). Los umbrales para el estrés hídrico están relacionados con el agotamiento del agua del suelo, mientras que los umbrales asociados al estrés por temperatura del aire están relacionados con los grados de crecimiento.

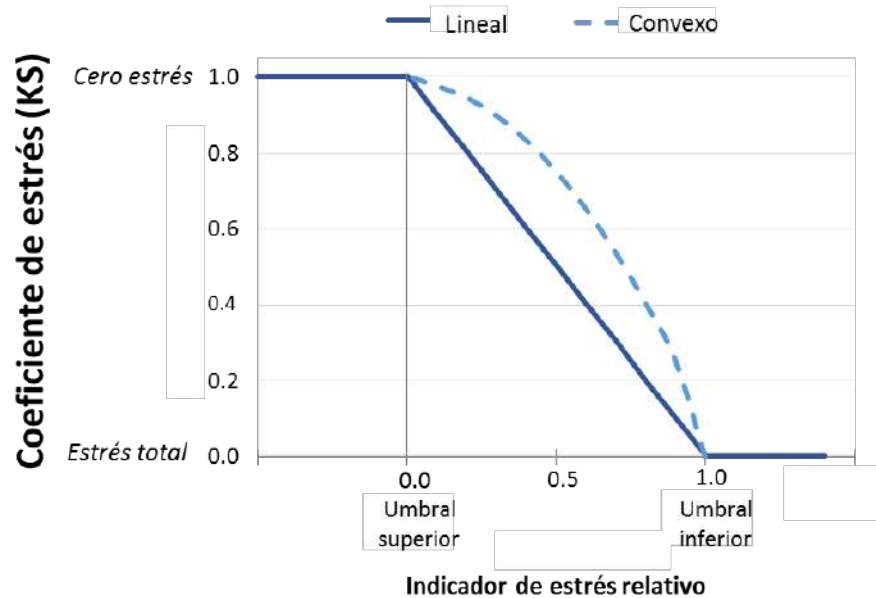


Figura 20. Función del coeficiente de estrés (K_s) (Adaptado de Steduto et al., 2012, p. 32)

El modelo permite calcular los efectos del déficit hídrico (entendido como falta de agua en la región radicular del suelo) en el crecimiento de la cobertura vegetal, la conductancia estomática, la senescencia temprana, la profundización de la raíz y el índice de cosecha. La Figura 21 muestra estos cinco procesos (líneas punteadas), dentro del esquema general de desarrollo de rendimiento bajo estrés hídrico. Un resumen general del proceso de cálculo se presenta a continuación. Nótese que todos los pasos del proceso se calculan en intervalos de tiempo diarios.

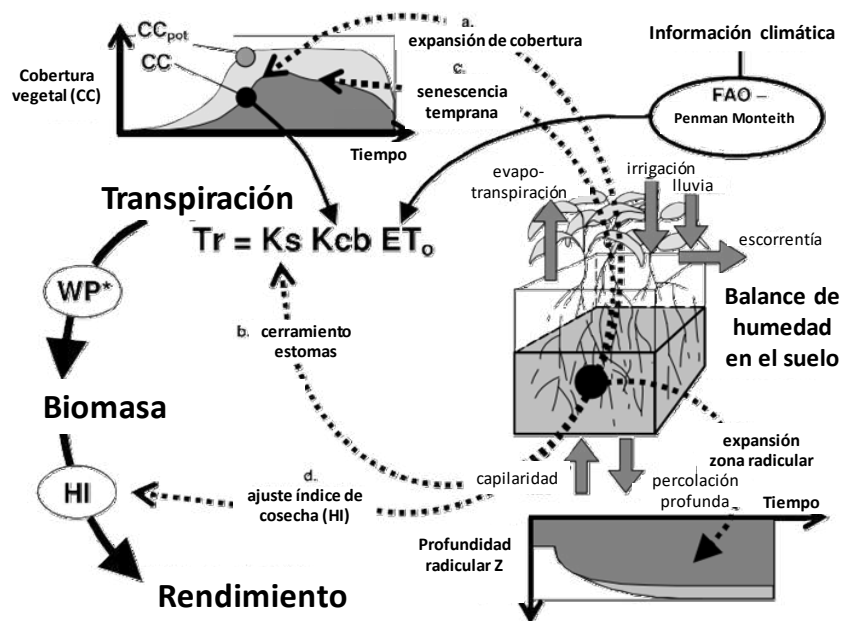


Figura 21. Representación esquemática de la respuesta del cultivo al estrés hídrico (Adaptado de Raes et al., 2011)

1. **Balance del agua en el suelo:** determina la cantidad de agua almacenada en la zona radicular, contabilizando los flujos de agua entrante y saliente. El crecimiento del cultivo no se ve afectado y no hay estrés hídrico ($K_s = 1$) entre el nivel de capacidad de campo (FC) y el nivel superior de agotamiento de la zona de raíz. En el otro extremo, entre el umbral inferior en el agotamiento de la zona de raíz y el punto de marchitamiento permanente hay tensión total ($K_s = 0$) y el crecimiento del cultivo se ve completamente impactado. A medida que se reduce el agua almacenada en el volumen de control del suelo, el coeficiente de estrés disminuye.
2. **Expansión de la cobertura vegetal:** Se simula el efecto del déficit hídrico en la expansión de la cobertura, mediante la reducción del coeficiente de crecimiento vegetal (CGC) por el coeficiente de estrés hídrico para la expansión de cobertura $K_{s,exp,w}$, y modificando el coeficiente de disminución de cobertura por coeficiente de estrés hídrico de senescencia temprana $K_{s,sen}$. Por una parte, cuando el agotamiento de la zona radicular está por debajo de los umbrales superiores de contenido de agua, $K_{s,exp,w}$ se hace menor que 1 y la cobertura reduce su tasa de expansión. Cuando el agotamiento de la zona radicular está por debajo del límite inferior, $K_{s,exp,w} = 0$ y se detiene el desarrollo de la cobertura. Por otra parte, cuando el estrés hídrico es severo (agotamiento de la zona radicular cerca del punto de marchitamiento permanente), se desencadena la senescencia temprana. El grado de senescencia está descrito por $K_{s,sen}$. La cobertura vegetal máxima no puede ser alcanzada bajo condiciones de estrés hídrico, o podría alcanzarse en una última etapa de la temporada, como se muestra en la Figura 23.

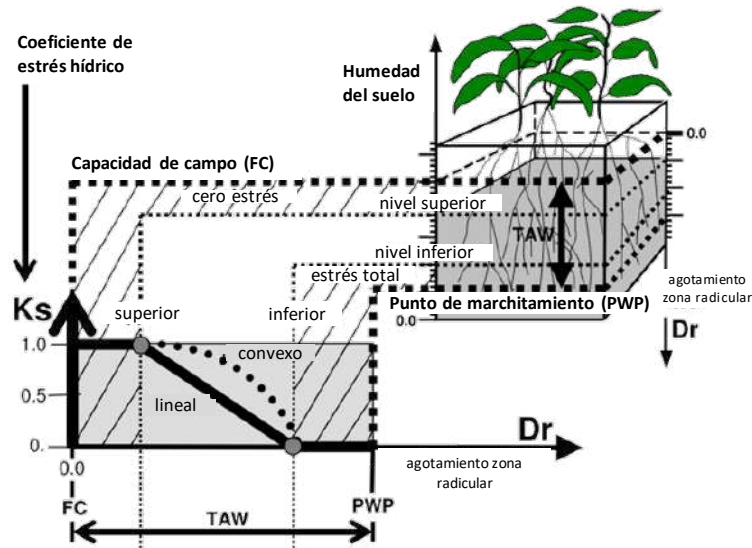


Figura 22. Representación esquemática del coeficiente de estrés hídrico (Adaptado de Raes et al., 2011)

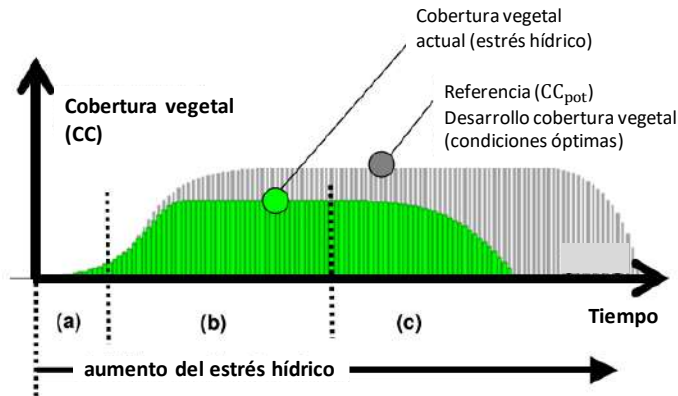


Figura 23. Representación esquemática de la expansión de la cobertura vegetal, bajo condiciones óptimas (gris) y bajo estrés hídrico (verde). (Adaptado de Raes et al., 2011)

3. **Transpiración:** se calcula la potencia de evaporación de la atmósfera considerando un coeficiente de cultivo K_{cb} y el coeficiente de estrés hídrico K_s , como se muestra en la ecuación 7. La evapotranspiración potencial (ET_o) se calcula usando la ecuación de Penman-Monteith de FAO (ecuación 1) (Allen et al., 1998).

$$Tr = K_s(K_{cb}CC^*)ET_o$$

Ecuación 7

El coeficiente de transpiración del cultivo K_{cb} es un parámetro que debe ser ajustado continuamente en función de la cobertura vegetal simulada, con el fin de considerar los efectos de envejecimiento y senescencia. El coeficiente de estrés hídrico K_s , utilizado en caso de escasez de agua es un coeficiente de estrés por cierre estomático $K_{s,sto}$, también con valores entre 1 (sin estrés) y 0 (total estrés).

4. *Biomasa arriba de la superficie*: La relación entre la biomasa producida y el agua consumida por un cultivo específico se conoce es la productividad del agua (WP), la cual tiende a ser lineal para una condición climática dada, como se muestra en la ecuación 8. Para incluir condiciones climáticas alteradas, se emplea la productividad del agua normalizada WP^{**} en la simulación del desarrollo de biomasa sobre el suelo. Utilizando el parámetro normalizado, el modelo puede aplicarse a diferentes regiones y estaciones. La normalización se realiza para la concentración atmosférica de CO_2 y la demanda evaporativa de la atmósfera (Dirk Raes et al., 2011).

La producción de biomasa arriba de la superficie se calcula, para un paso de tiempo diario, de la siguiente manera:

$$B = K_{sb} WP^* \sum_i \frac{Tr_i}{ETO_i} \quad \text{Ecuación 8}$$

en donde la productividad del agua normalizada WP^* se multiplica por la relación entre la transpiración del cultivo y la evapotranspiración de referencia del día de cálculo $\frac{Tr_i}{ETO_i}$ (expresión que se agrega durante todo el periodo de desarrollo del cultivo), y por el coeficiente de estrés por temperatura K_{sb} . Este coeficiente decrece a medida que la temperatura disminuye, y alcanza un valor de cero cuando hace demasiado frío y se detiene el crecimiento vegetal.

5. *Rendimiento*: Como se mencionó anteriormente, el rendimiento se calcula de multiplicar la biomasa sobre el suelo por un índice de cosecha, que depende del tipo de cultivo. Para considerar el estrés hídrico, debe ajustarse el índice de cosecha de su valor de referencia HI_o en condiciones óptimas, a su valor en condiciones reales, mediante la inclusión del factor f_{HI} :

$$Y = f_{HI} * HI_o * B \quad \text{Ecuación 9}$$

El índice de cosecha puede ajustarse al déficit hídrico y a las variaciones de la temperatura del aire, y depende de la etapa del cultivo y la intensidad del estrés durante la temporada de crecimiento.

5 EVALUACIÓN DEL RIESGO

En esta sección se incluyen algunas consideraciones generales sobre la metodología de evaluación del riesgo y la formulación matemática requerida. Para mayores detalles, consultar Bernal et al. 2021. Al realizar la evaluación de riesgo por escenarios, los eventos de sequía o incendio valorados se organizan en una gráfica de pérdida vs. tiempo, como se muestra en la Figura 24. Al establecer una pérdida económica p , se puede identificar en la gráfica todos los eventos cuyas pérdidas exceden p . Los tiempos entre eventos $(T_1, T_2, \dots, T_{1n})$ también se estiman a partir de la Figura 24 y se usan para estimar el parámetro λ de una distribución exponencial, la cual corresponde a la distribución de probabilidad del tiempo entre eventos de un proceso de Poisson. Además, este parámetro de la distribución exponencial tiene la particularidad de ser el mismo λ que define el proceso de Poisson completamente (i.e. es la misma tasa de excedencia, $\lambda = v(p)$). Para el caso de la evaluación prospectiva del riesgo por sequía, la ventana de tiempo considerada para calcular λ es igual al número de simulaciones estocásticas de las series climáticas, y en este caso es de 1,000 años equivalentes.

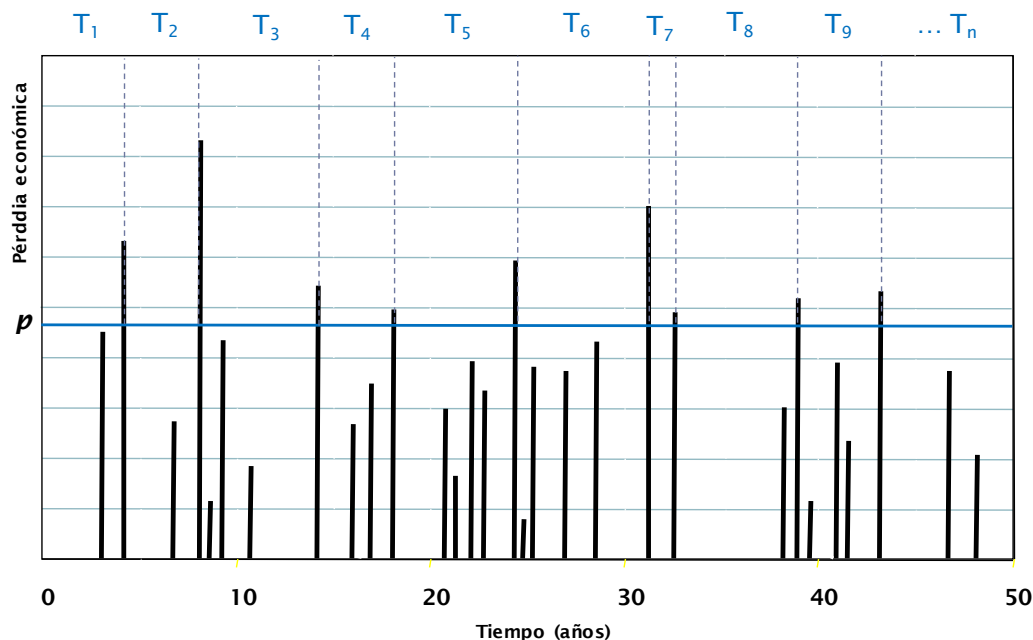


Figura 24. Pérdidas por evento en una ventana amplia de tiempo

La tasa de excedencia poblacional (λ) es estimada mediante la tasa de excedencia empírica (Λ) de la siguiente manera:

$$\Lambda = \frac{n-1}{\sum_{i=1}^n T_i} \quad \text{Ecuación 10}$$

En donde n es el número de eventos que superan la pérdida p y T_i son los tiempos observados. Este estimador cumple con los cuatro criterios estadísticos de calidad de la estimación de parámetros de distribuciones de probabilidad: es no sesgado, de varianza mínima, consistente y suficiente. Ahora bien, es posible demostrar que el estimador Λ sigue una distribución de probabilidad *Gamma inversa* con parámetros n y $(n-1)\lambda$, a partir de lo cual se puede determinar su coeficiente de variación (CV) como:

$$CV = \frac{1}{\sqrt{n-2}}$$

Ecuación 11

El coeficiente de variación indica la relación entre la desviación estándar y la media de una variable aleatoria. Como se indica en la Ecuación 11, CV disminuye a medida que el número de datos (n) aumenta. La Ecuación 11 es una fórmula estándar, aplicable a cualquier problema de estimación del riesgo por eventos, en donde el CV de la tasa de excedencia varía con el tamaño de la muestra cómo se indica en la Figura 25.

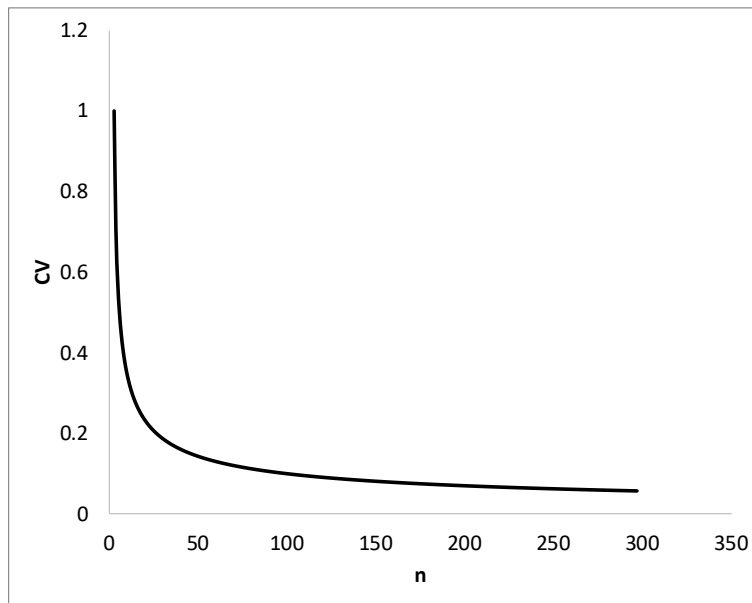


Figura 25. Variación del coeficiente de variación de la tasa de excedencia con el tamaño de la muestra.

El CV crece rápidamente a medida que n disminuye. Esto quiere decir que, al estimar la tasa de excedencia de pérdidas grandes (eventos catastróficos) a partir de pocos eventos modelados, para los cuales se contará con un valor pequeño de n (es decir, pocos eventos que exceden esa pérdida dentro del conjunto de escenarios de sequía), la dispersión de la estimación (i.e. su desviación estándar) es muy grande en comparación a la estimación misma, lo cual implica una mayor incertidumbre. Por el contrario, al estimar la tasa de excedencia de pérdidas con un mayor número de eventos modelados, n será necesariamente un número más grande y, en consecuencia, la dispersión de la tasa disminuye a valores incluso despreciables en la práctica. Esto es por lo que, para que el resultado sea estadísticamente suficiente se debe hacer uso de un gran número de años simulados dentro de los cuales se pueda identificar un número considerable de eventos de sequía.

5.1 Curva de excedencia de pérdidas

Como se mencionó anteriormente, la tasa de excedencia es igual al parámetro λ que define la ocurrencia en el tiempo de los eventos de pérdida, es decir:

$$v(p) = \frac{n_p - 1}{\sum_{i=1}^{n_p} T_i}$$

Ecuación 12

en donde p es la pérdida económica, $v(p)$ es su tasa anual de excedencia, n_p es el número total de eventos en los cuales se supera p y T_i es el tiempo i entre eventos que superan p . El periodo de retorno $Tr(p)$ se calcula como el inverso de la tasa de excedencia $v(p)$.

$$Tr = \frac{1}{v(p)}$$

Ecuación 13

El periodo de retorno es el valor esperado del tiempo entre eventos. Es decir, corresponde al periodo de tiempo promedio para el cual, considerando una ventana temporal de observación suficientemente amplia, se verá igualada o excedida una pérdida dada.

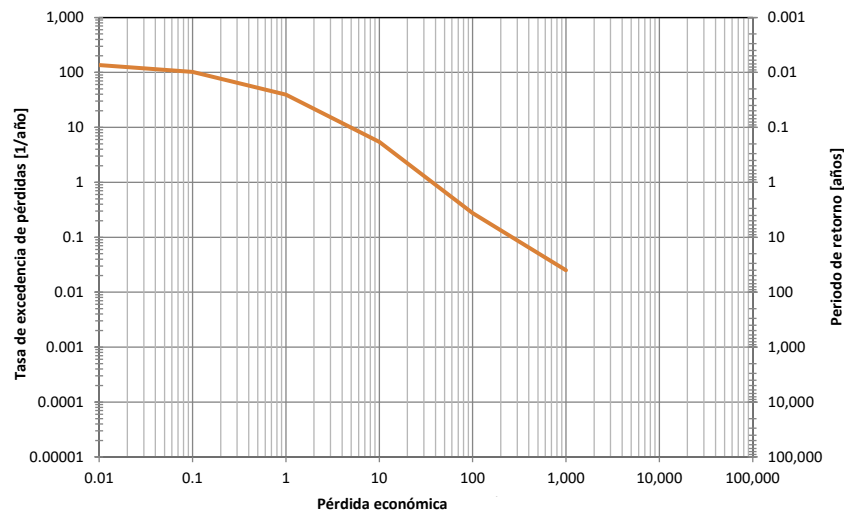


Figura 26. Ejemplo de curva de excedencia de pérdidas. El eje vertical muestra la tasa de excedencia (izquierda) y su valor inverso o periodo de retorno (derecha). El eje horizontal muestra la pérdida asociada.

El cálculo de la Ecuación 12 corresponde a la estimación de la tasa de excedencia de las cuantías de pérdida que ocurren en todos los elementos expuestos para todos los eventos potencialmente nocivos incluidos en el modelo de amenaza (el conjunto de escenarios estocásticos de sequía o incendio previamente identificados).

5.2 Métricas del riesgo

A partir de la curva de excedencia de pérdidas es posible obtener diversas métricas del riesgo, las cuales son útiles para diferentes fines dentro de la toma de decisiones y la gestión del riesgo. Estas métricas pretenden proporcionar una representación integral del riesgo, por lo general condensada en uno o unos pocos números, en lugar de proporcionar todo el conjunto de las pérdidas por escenarios o la curva de excedencia de pérdidas completa.

5.2.1 La pérdida anual esperada (PAE)

La PAE corresponde al valor esperado de la pérdida anual. Indica el valor anual que debe pagarse para compensar, en el largo plazo, todas las pérdidas futuras. En un esquema simple de seguro, la PAE sería la prima pura anual justa. Se calcula como la integral de la curva de excedencia de pérdidas,

$$PAE = \int_0^{\infty} v(p) dp \quad \text{Ecuación 14}$$

La pérdida anual esperada es un indicador importante dado que integra en un único valor el efecto, en términos de pérdida, de la ocurrencia de los escenarios de amenaza sobre los elementos expuestos vulnerables. Se considera como el indicador más robusto de riesgo, no solo por su capacidad de resumir el proceso de generación de pérdidas en un solo número, sino por ser insensible a la incertidumbre, debido a que determina la esperanza matemática de las pérdidas en una base anual, y no su incertidumbre.

5.2.2 La pérdida máxima probable (PML)

Se denota PML por sus siglas en inglés (Probable Maximum Loss). Corresponde a una pérdida que ocurre poco frecuentemente, es decir, que está asociada a un periodo de retorno grande. En realidad, la PML es una curva que relaciona las pérdidas a su correspondiente periodo de retorno. No obstante, es práctica común definir la PML como un único valor. La selección del periodo de retorno de la PML depende exclusivamente de la aversión al riesgo del tomador de decisiones. Por ejemplo, en la industria aseguradora el periodo de retorno de la PML se toma usualmente entre 200 y 1500 años. Mayores detalles sobre el significado y aplicación de la PML pueden encontrarse en Marulanda (2013).

5.2.3 La probabilidad de quiebra (PQ)

Asumiendo que el proceso de ocurrencia de las pérdidas en el tiempo sigue un proceso de Poisson, es posible determinar la probabilidad de alcanzar o exceder un nivel de pérdida dado, en un periodo de exposición particular,

$$Pr(P > p)_T = 1 - e^{-v(p)T} \quad \text{Ecuación 15}$$

en donde $Pr(P > p)_T$ es la probabilidad de excedencia de la pérdida p , en el lapso de tiempo T (dado en años). Si la pérdida p corresponde a la PML, se obtiene lo que se conoce como la probabilidad de quiebra (P_Q), la cual no es más que la probabilidad de exceder la PML en un lapso T .

$$P_Q = 1 - e^{-T/Tr(PML)} \quad \text{Ecuación 16}$$

5.2.4 Otras métricas del riesgo

La curva de excedencia de pérdidas contiene toda la información necesaria para caracterizar de manera rigurosa la ocurrencia de pérdidas. Es posible determinar directamente de $v(p)$ otras métricas del riesgo que pueden ser relevantes para la toma de decisiones. Aquí se presentan algunos ejemplos.

La función de densidad de probabilidad de la pérdida durante el próximo evento, o un evento tomado al azar, se obtiene como,

$$f(p) = -\frac{1}{v(0)} \frac{dv(p)}{dp} \quad \text{Ecuación 17}$$

La probabilidad de exceder un nivel de pérdida particular tras la ocurrencia del próximo evento, o un evento tomado al azar, se puede calcular como,

$$Pr(P > p) = \frac{v(p)}{v(0)} \quad \text{Ecuación 18}$$

La función de densidad de probabilidad del tiempo hasta la ocurrencia del próximo evento (t) es exponencial y se define como,

$$f(t) = v(p)e^{-v(p)t} \quad \text{Ecuación 19}$$

El número de eventos (N) que ocurrirán en un lapso T , que igualan o exceden la pérdida p , se distribuye Poisson, por lo cual la probabilidad que ese número sea igual a n es,

$$Pr(N = n) = \frac{(v(p)T)^n e^{-v(p)T}}{n!} \quad \text{Ecuación 20}$$

5.3 Resultados de la evaluación

La Tabla 24 muestra los valores de la pérdida anual esperada (PAE) para los 4 municipios, tanto para el clima actual como para los climas futuros considerados. La Figura 27 presenta la PAE relativa de forma gráfica, en donde es posible comparar la diferencia en el riesgo causada por el cambio climático en cada municipio. La Figura 28 muestra las curvas de PML de cada municipio.

Tabla 24. Pérdidas Anuales Esperadas por sequía

Municipio	Valor expuesto (COP millones)	Clima base		RCP 2.6		RCP 4.5	
		(COP millones)	(%)	(COP millones)	(%)	(COP millones)	(%)
San Onofre	\$ 20,406	\$ 2,449	12.0	\$ 2,591	12.7	\$ 2,347	11.5
Lorica	\$ 30,097	\$ 5,959	19.8	\$ 6,682	22.2	\$ 5,568	18.5
Espinal	\$ 225,970	\$ 9,717	4.3	\$ 7,909	3.5	\$ 9,491	4.2
Guamo	\$ 212,401	\$ 11,470	5.4	\$ 9,346	4.4	\$ 9,133	4.3

Municipio	Valor expuesto (COP millones)	RCP 6.0		RCP 8.5		IDEAM	
		(COP millones)	(%)	(COP millones)	(%)	(COP millones)	(%)
San Onofre	\$ 20,406	\$ 2,734	13.4	\$ 2,816	13.8	\$ 2,694	13.2
Lorica	\$ 30,097	\$ 7,524	25.0	\$ 7,976	26.5	\$ 7,494	24.9
Espinal	\$ 225,970	\$ 10,621	4.7	\$ 7,683	3.4	\$ 7,909	3.5
Guamo	\$ 212,401	\$ 12,532	5.9	\$ 8,921	4.2	\$ 9,133	4.3

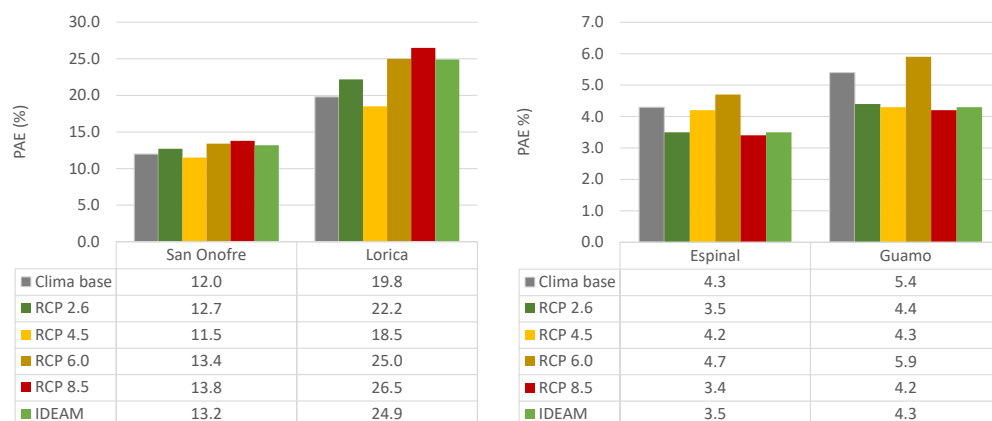


Figura 27. Pérdida anual esperada relativa por sequía (en porcentaje) para los 4 municipios, ante clima base y clima futuro.

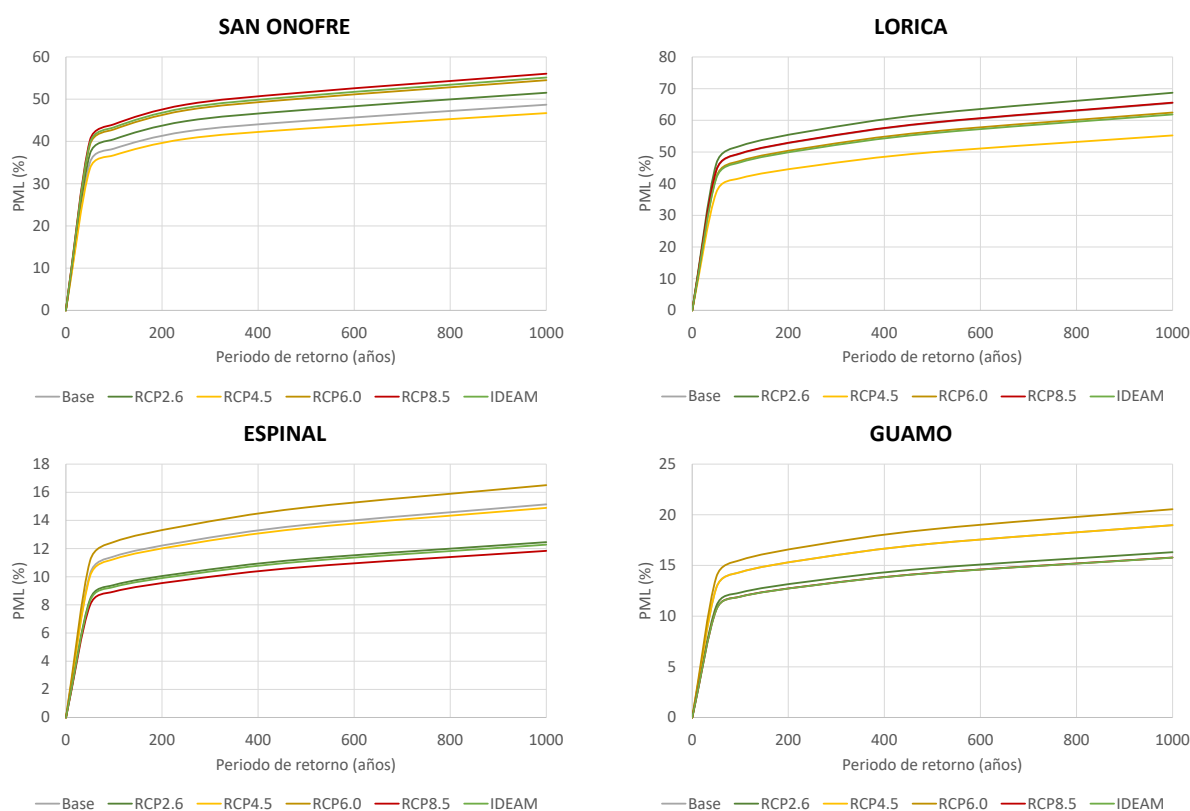


Figura 28. Curvas de PML relativa por sequía (en porcentaje) para los 4 municipios, ante clima base y clima futuro.

De la Figura 29 a la Figura 58 se presentan los mapas de pérdida anual esperada a escala de unidad de tierra cultivada, para la totalidad de portafolios incluidos en la evaluación. Los archivos georreferenciados correspondientes se incluyen en el Anexo Digital.

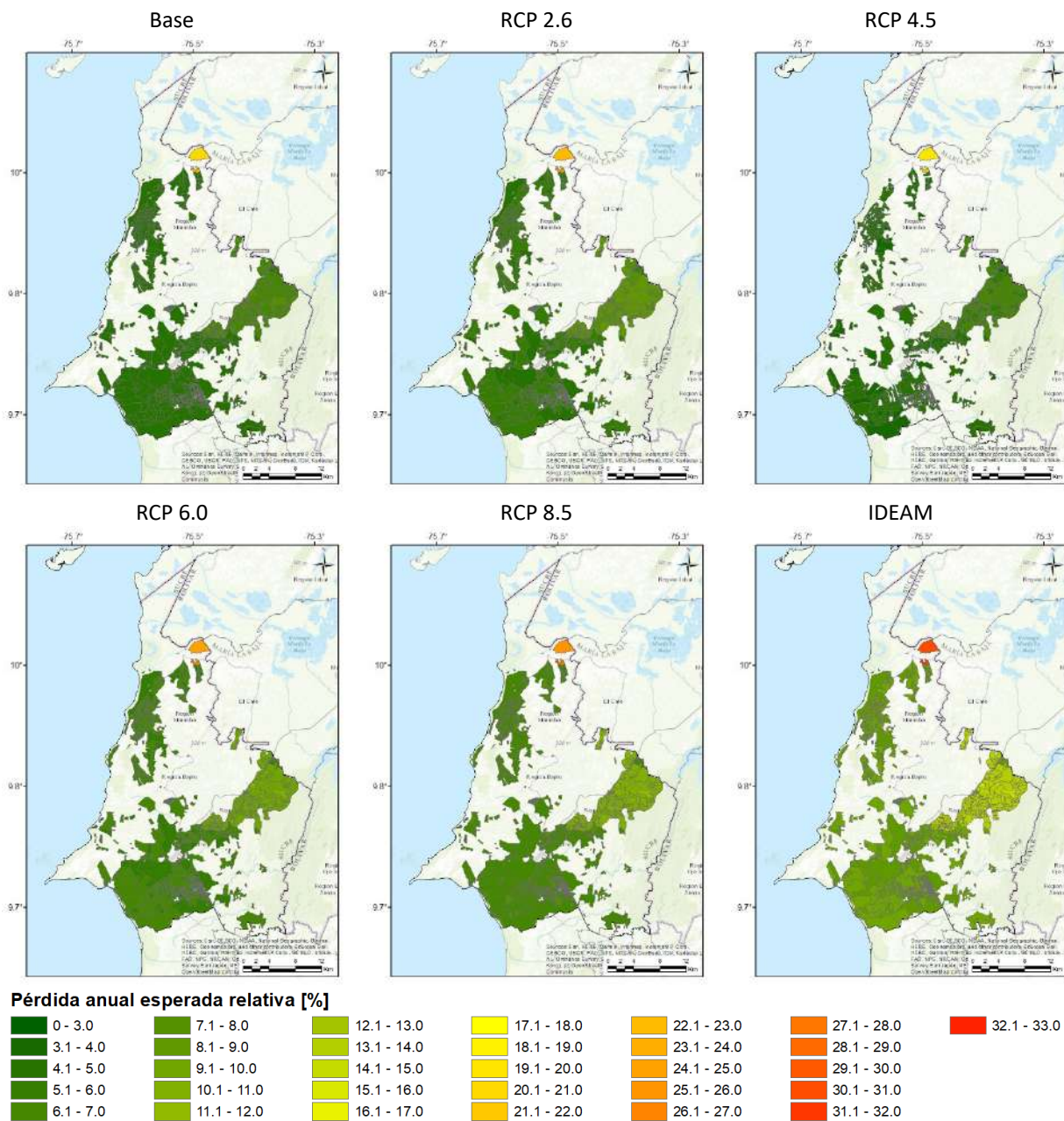


Figura 29. Maíz amarillo tecnificado – ciclo A. San Onofre

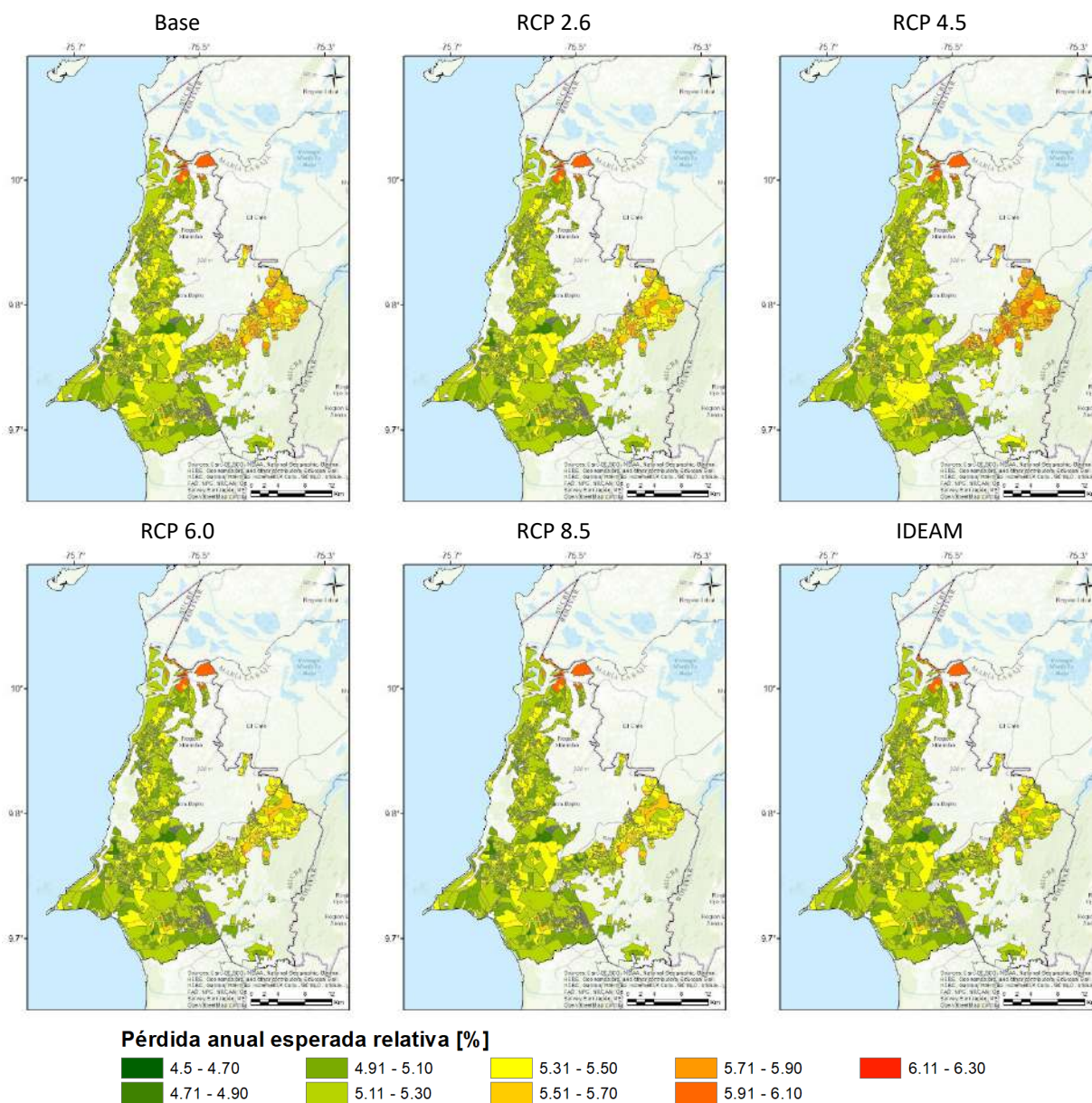


Figura 30. Maíz amarillo tradicional – ciclo A. San Onofre

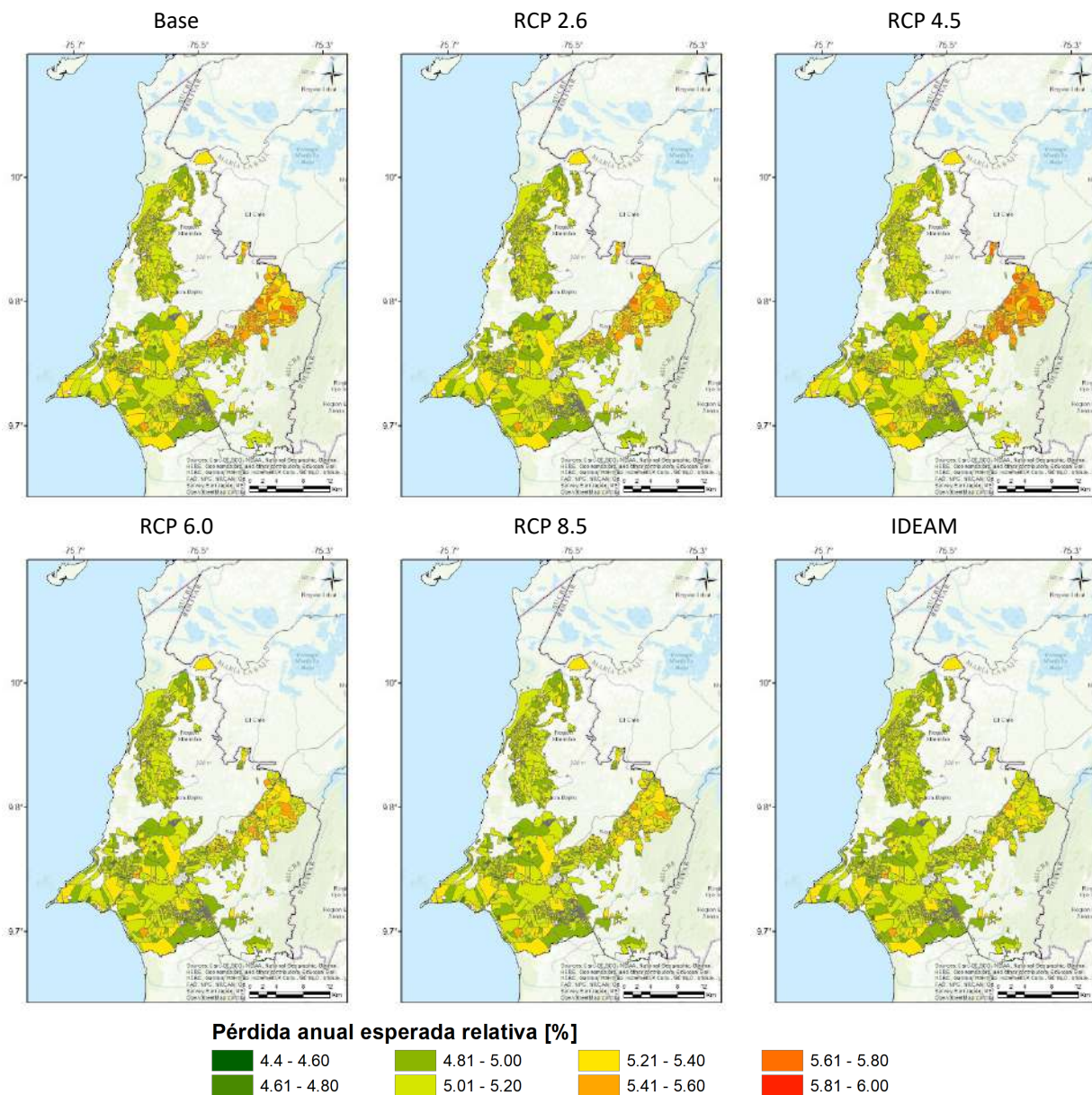


Figura 31. Maíz amarillo tradicional – ciclo B. San Onofre

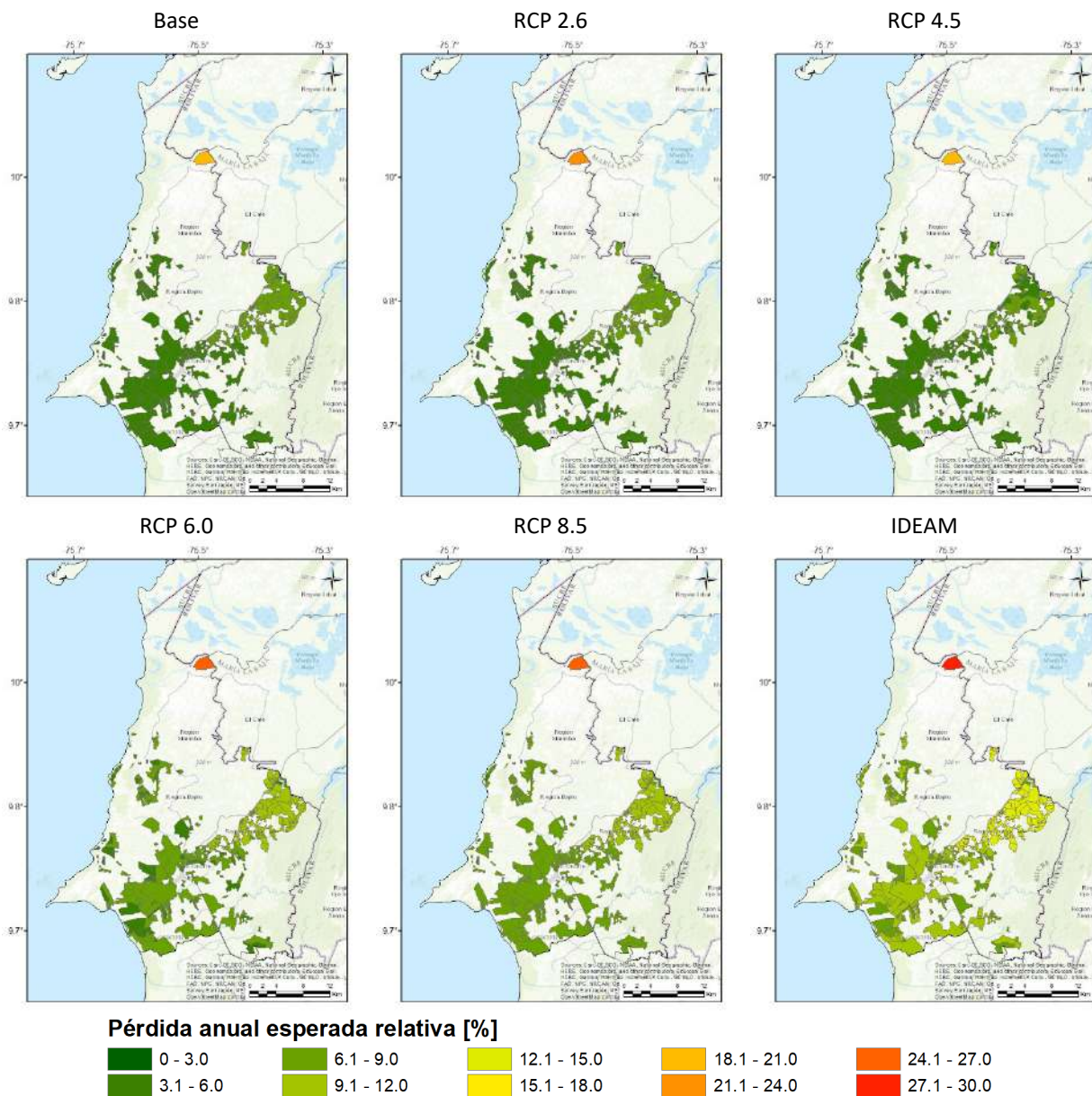


Figura 32. Maíz blanco tecnificado – ciclo A. San Onofre

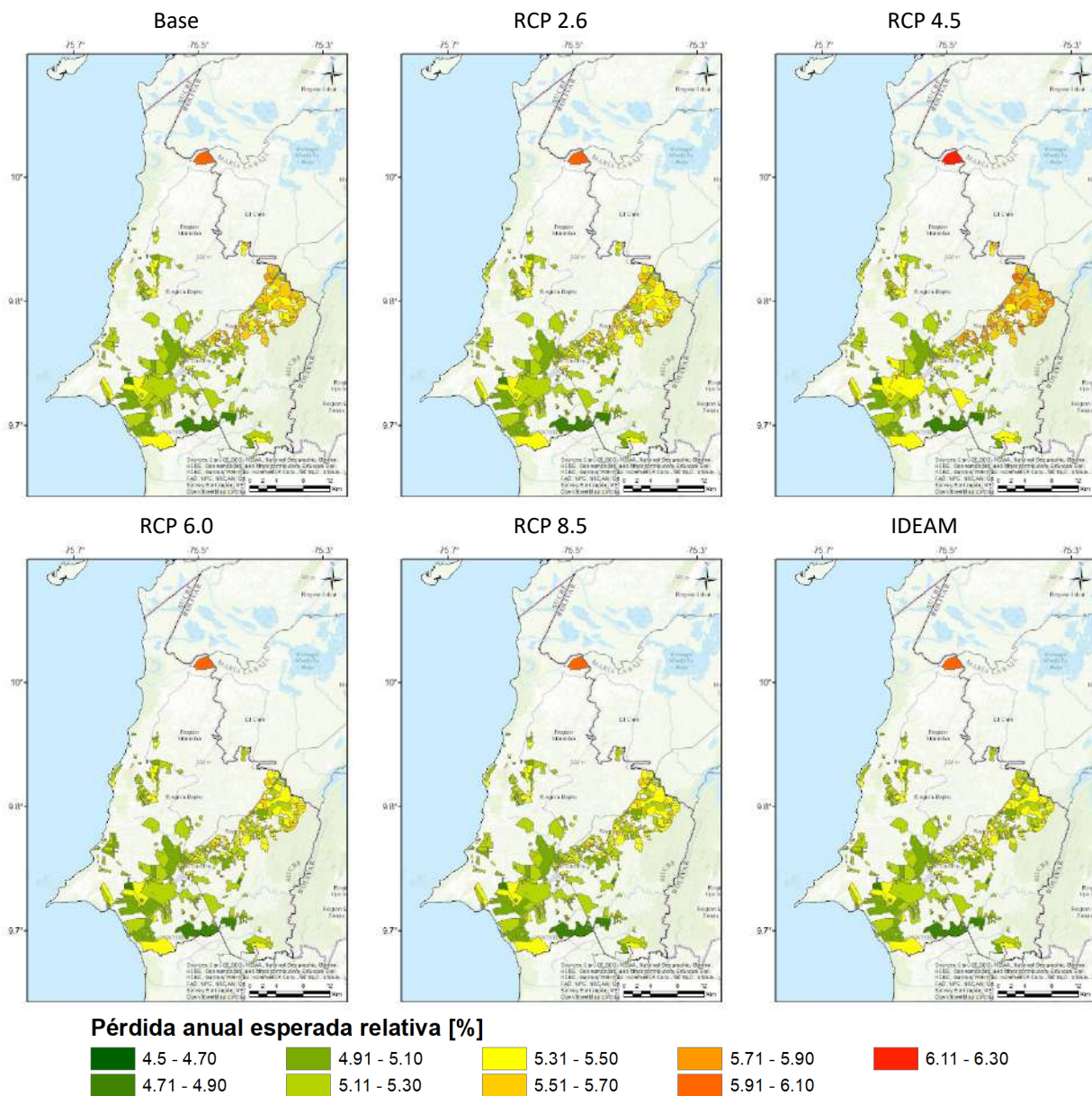


Figura 33. Maíz blanco tradicional – ciclo A. San Onofre

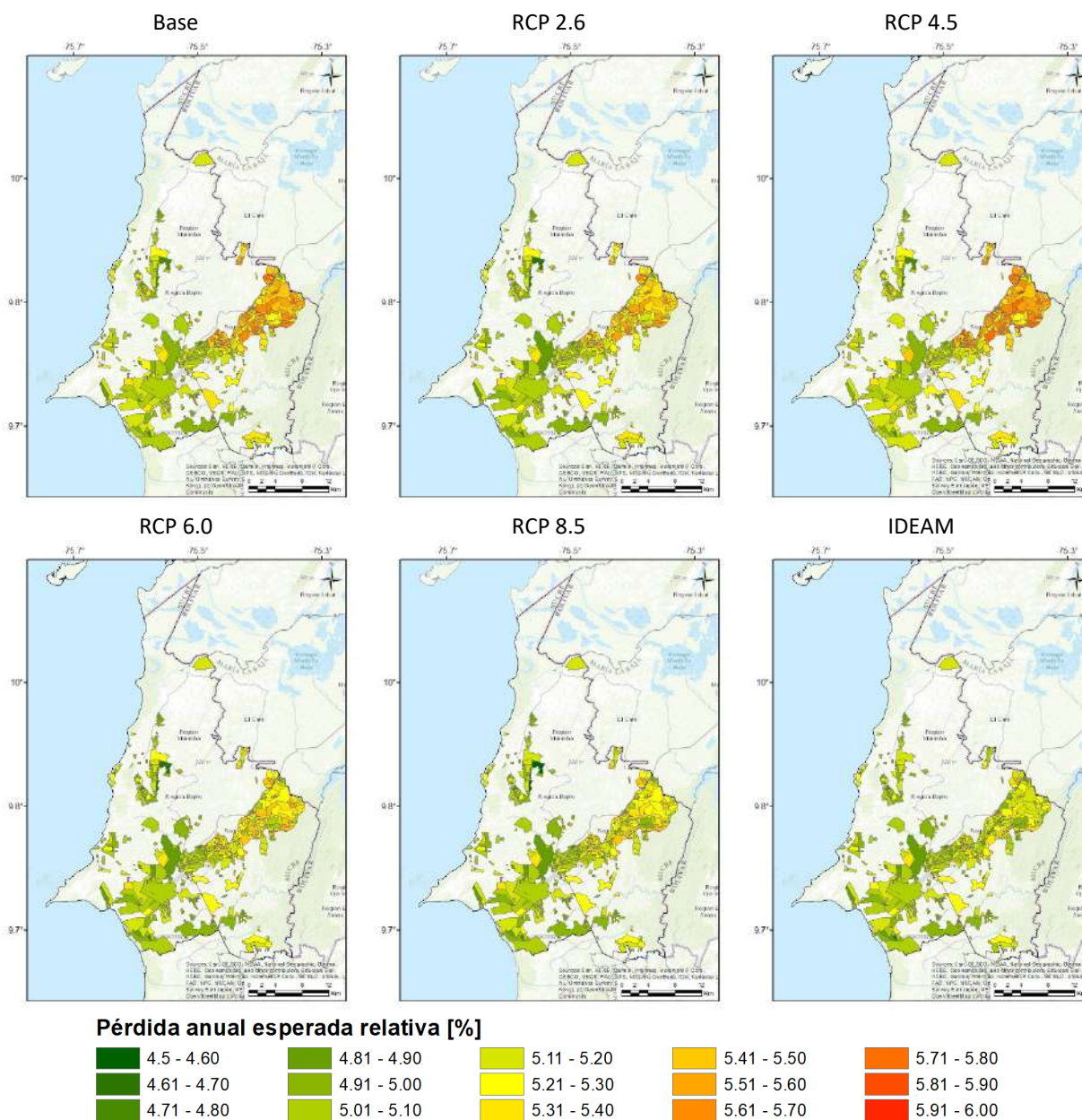


Figura 34. Maíz blanco tradicional – ciclo B. San Onofre

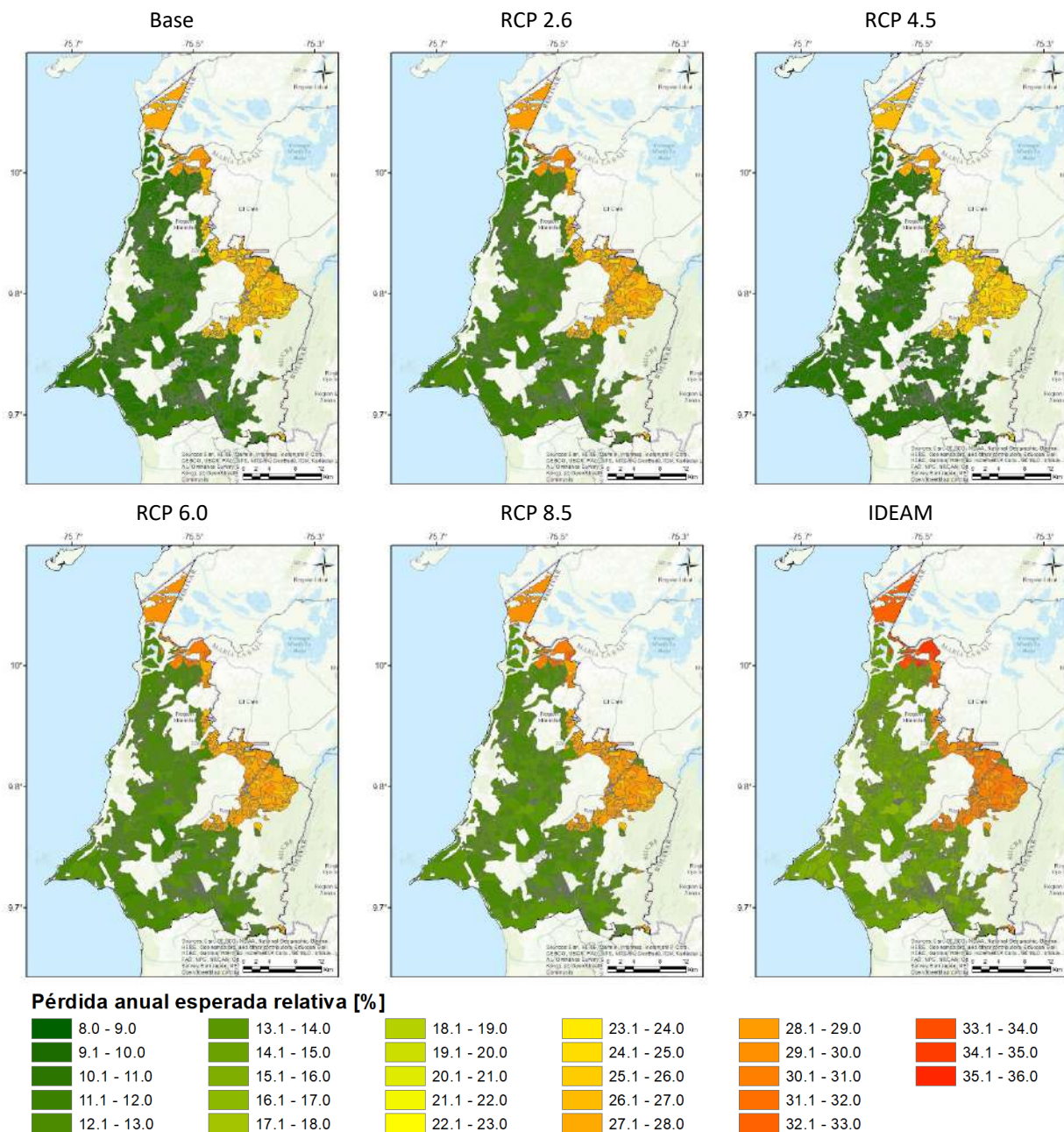


Figura 35. Yuca. San Onofre

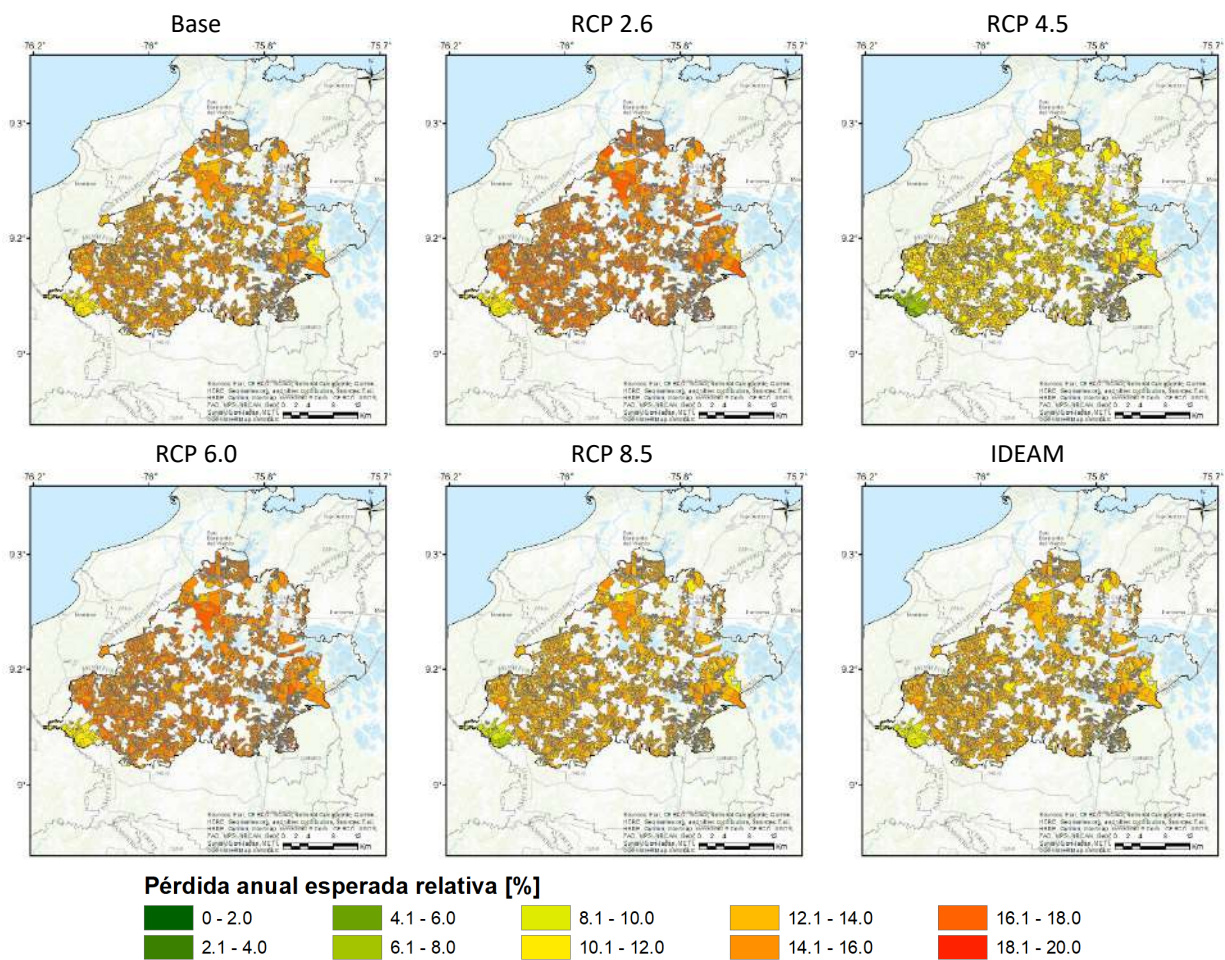


Figura 36. Arroz de riego – ciclo B. Lorica

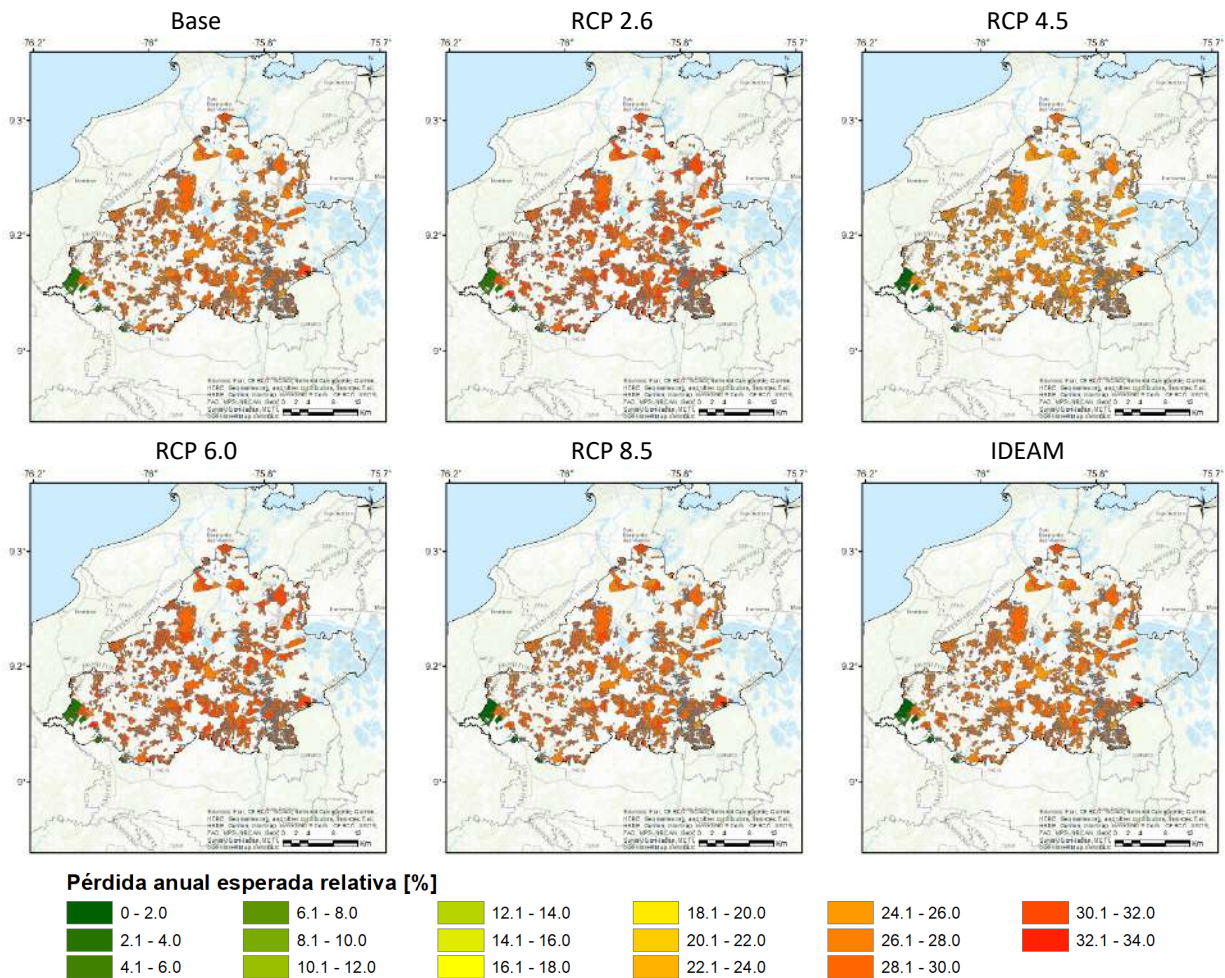


Figura 37. Arroz secano – ciclo A. Lorica

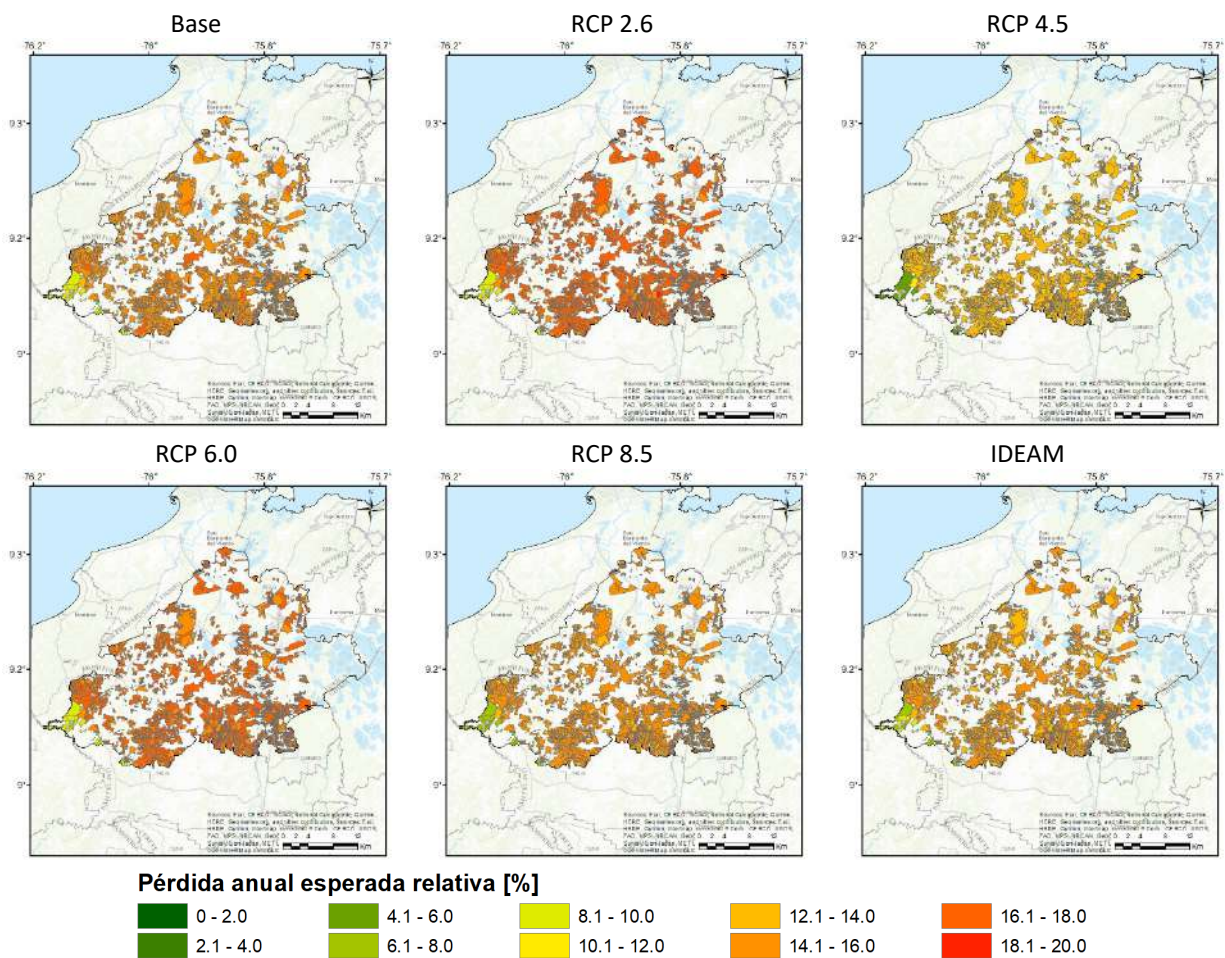


Figura 38. Arroz seco – ciclo B. Loric

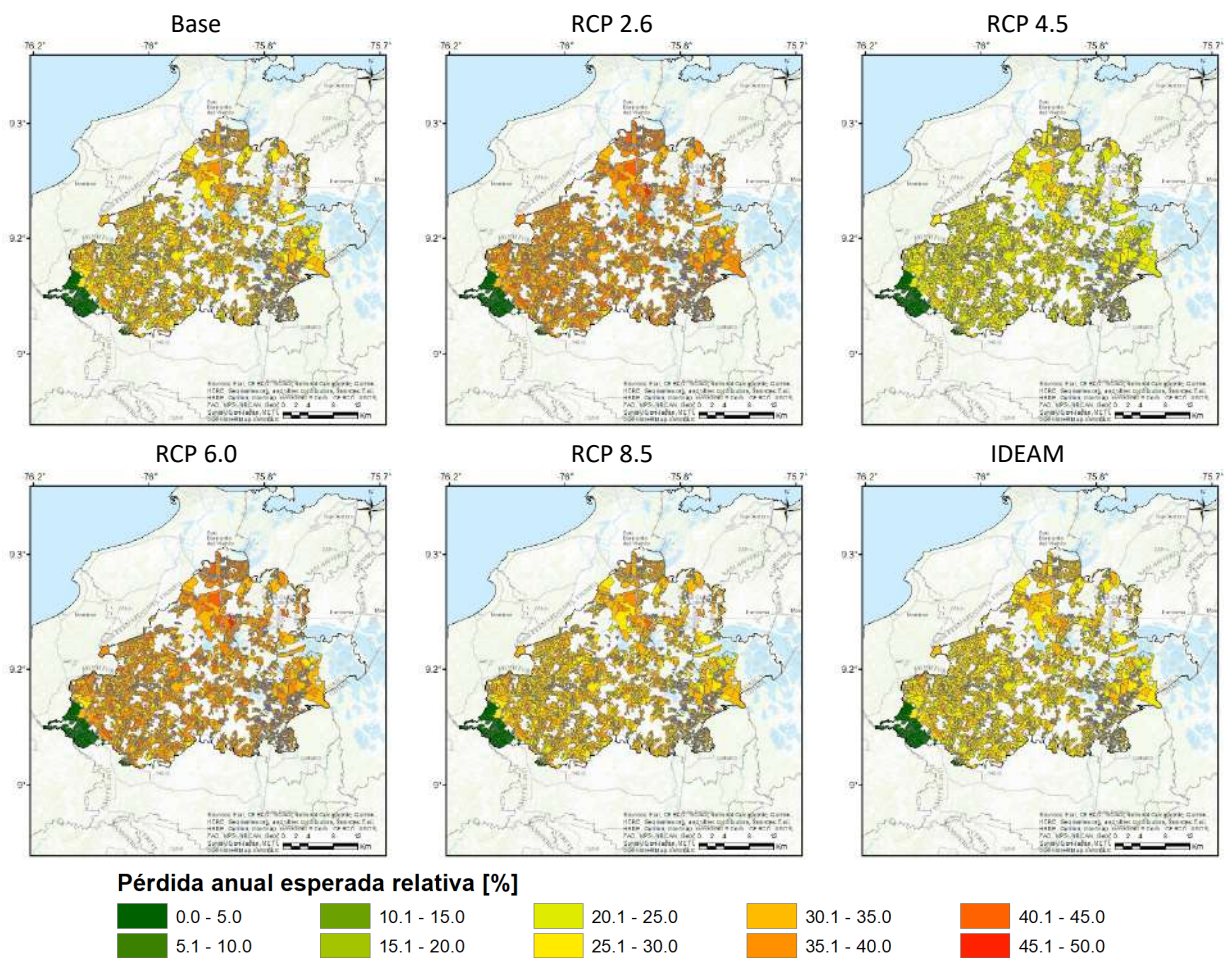


Figura 39. Maíz amarillo tecnificado – ciclo A. Lorica

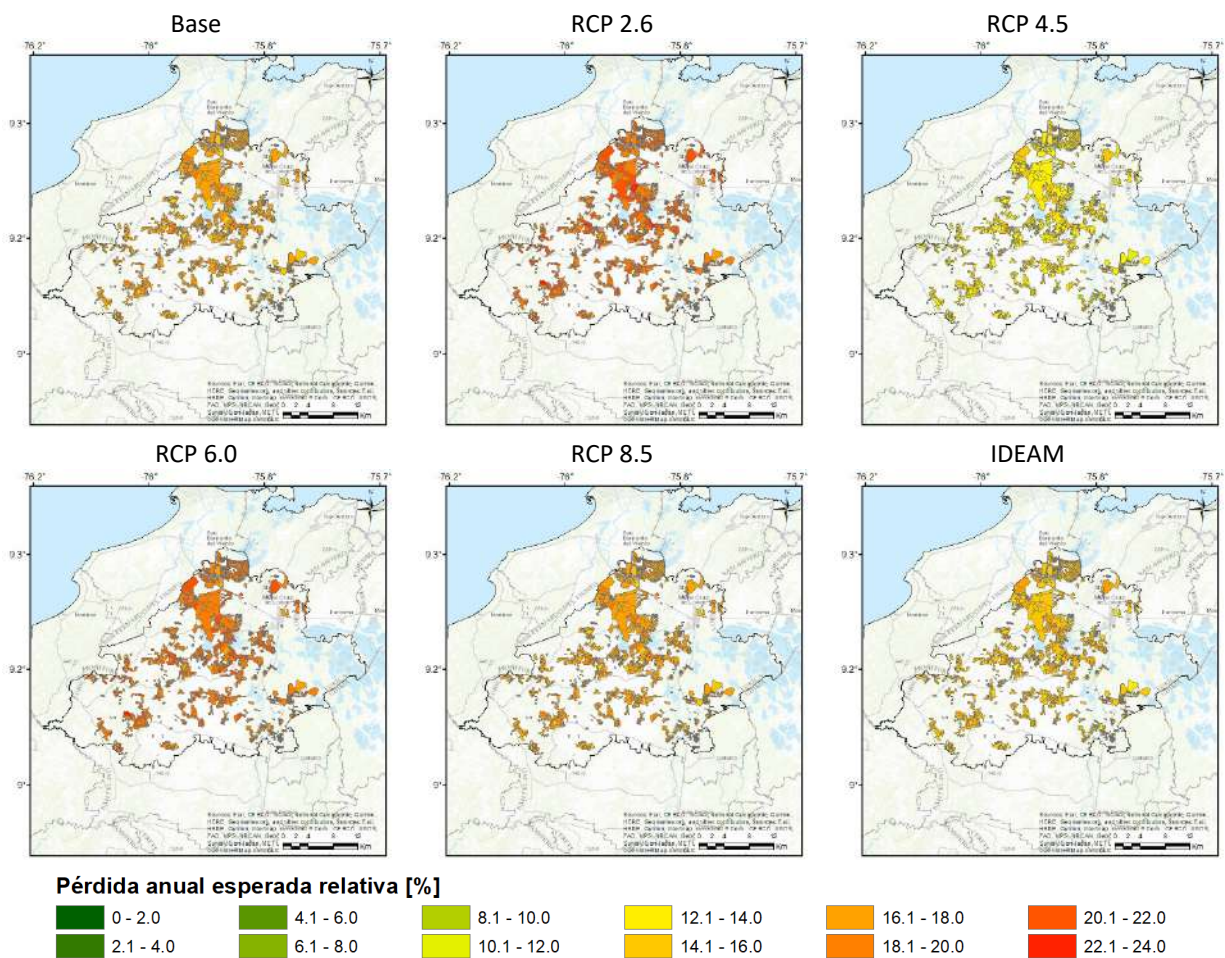


Figura 40. Maíz amarillo tecnificado – ciclo B. Lorica

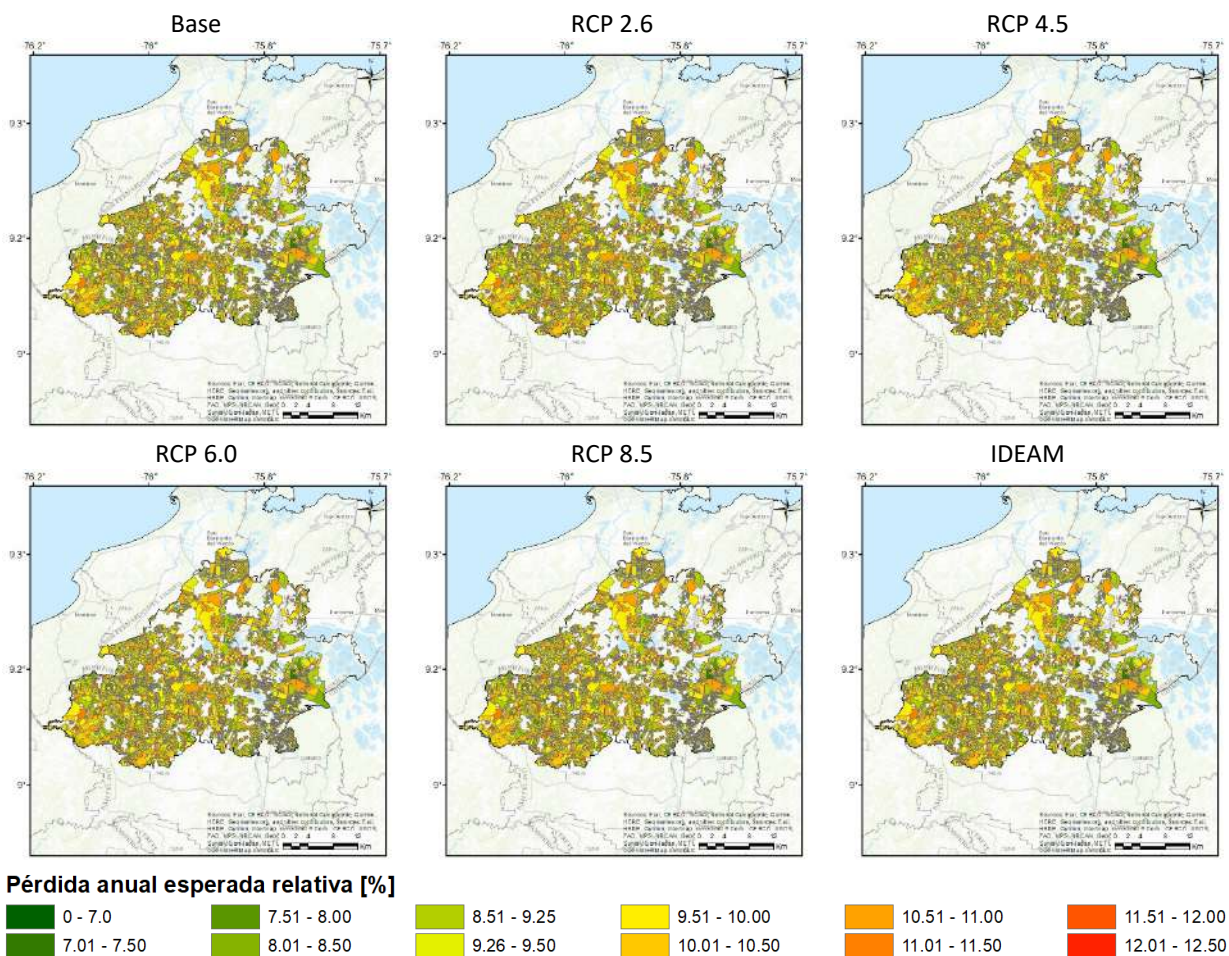


Figura 41. Maíz amarillo tradicional – ciclo A. Llorca

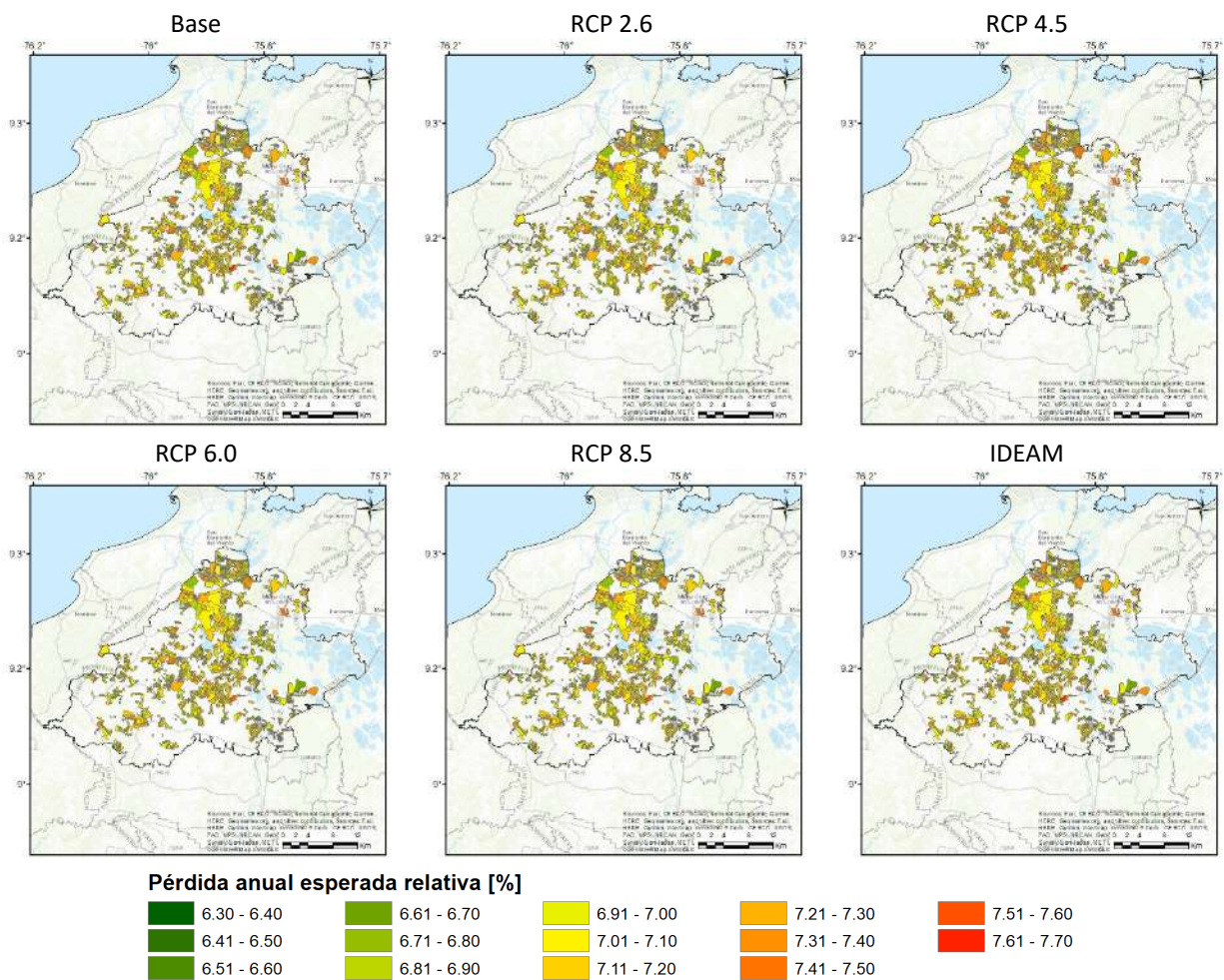


Figura 42. Maíz amarillo tradicional – ciclo B. Lórica

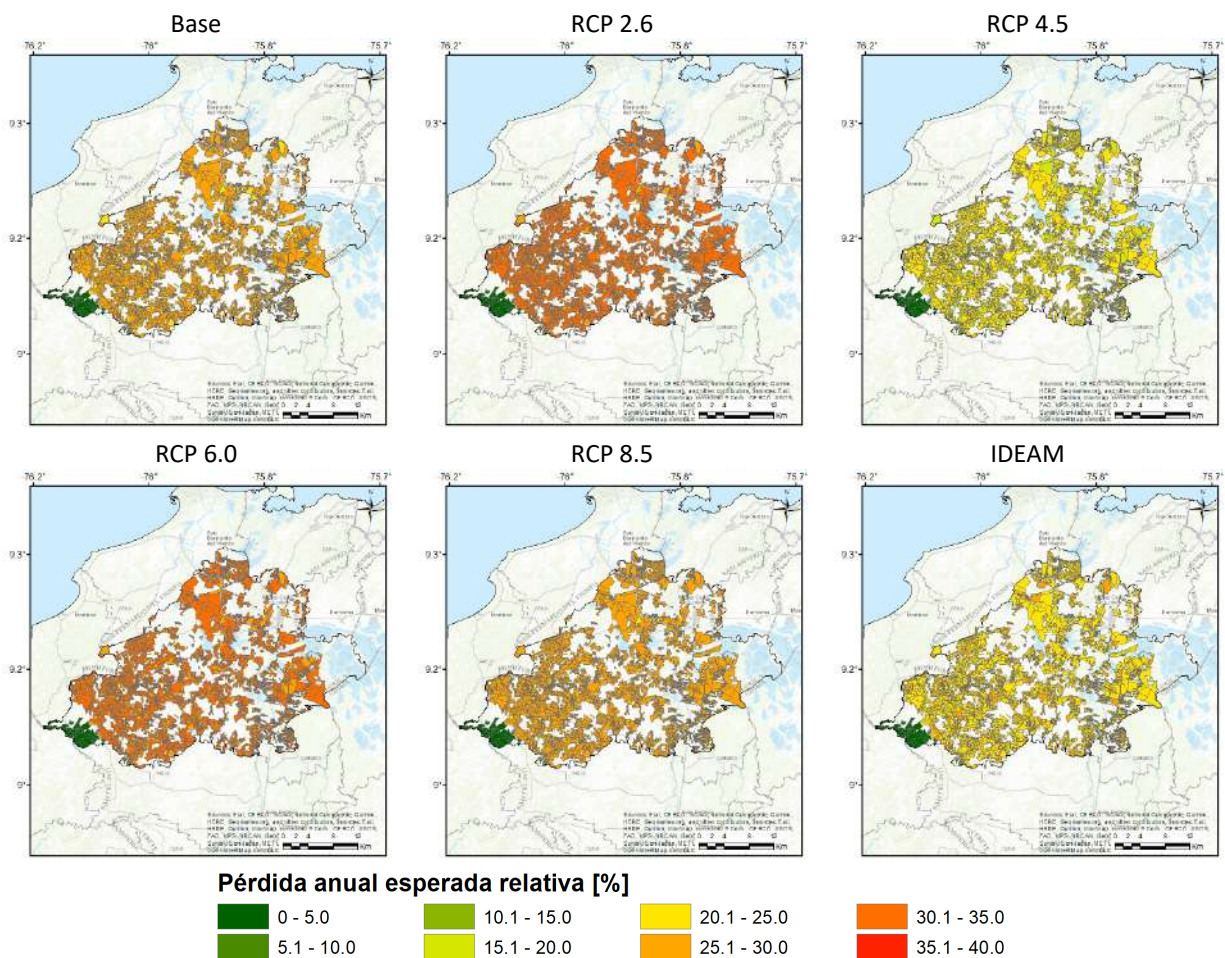


Figura 43. Maíz blanco tecnificado – ciclo A. Loricá

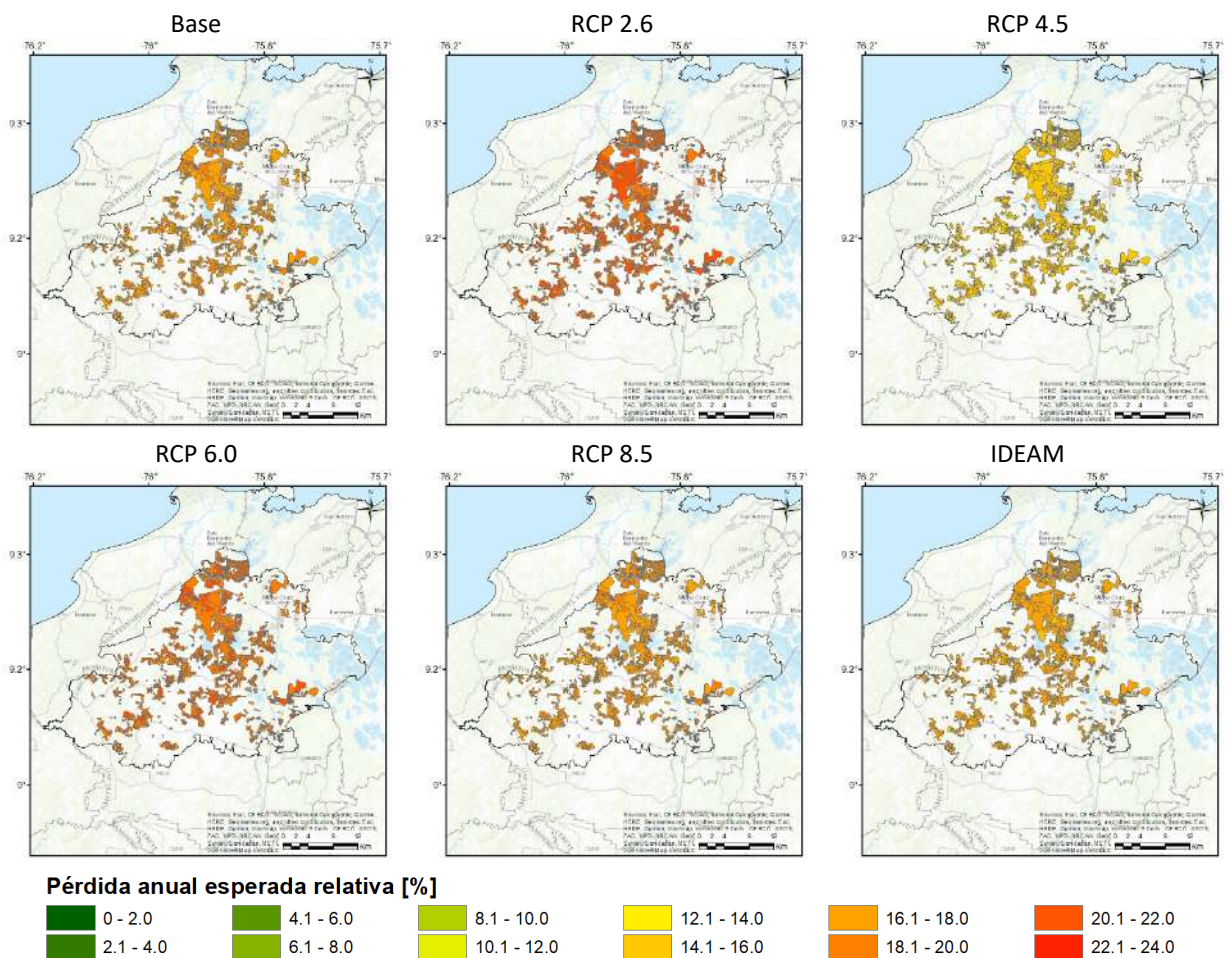


Figura 44. Maíz blanco tecnificado – ciclo B. Llorca

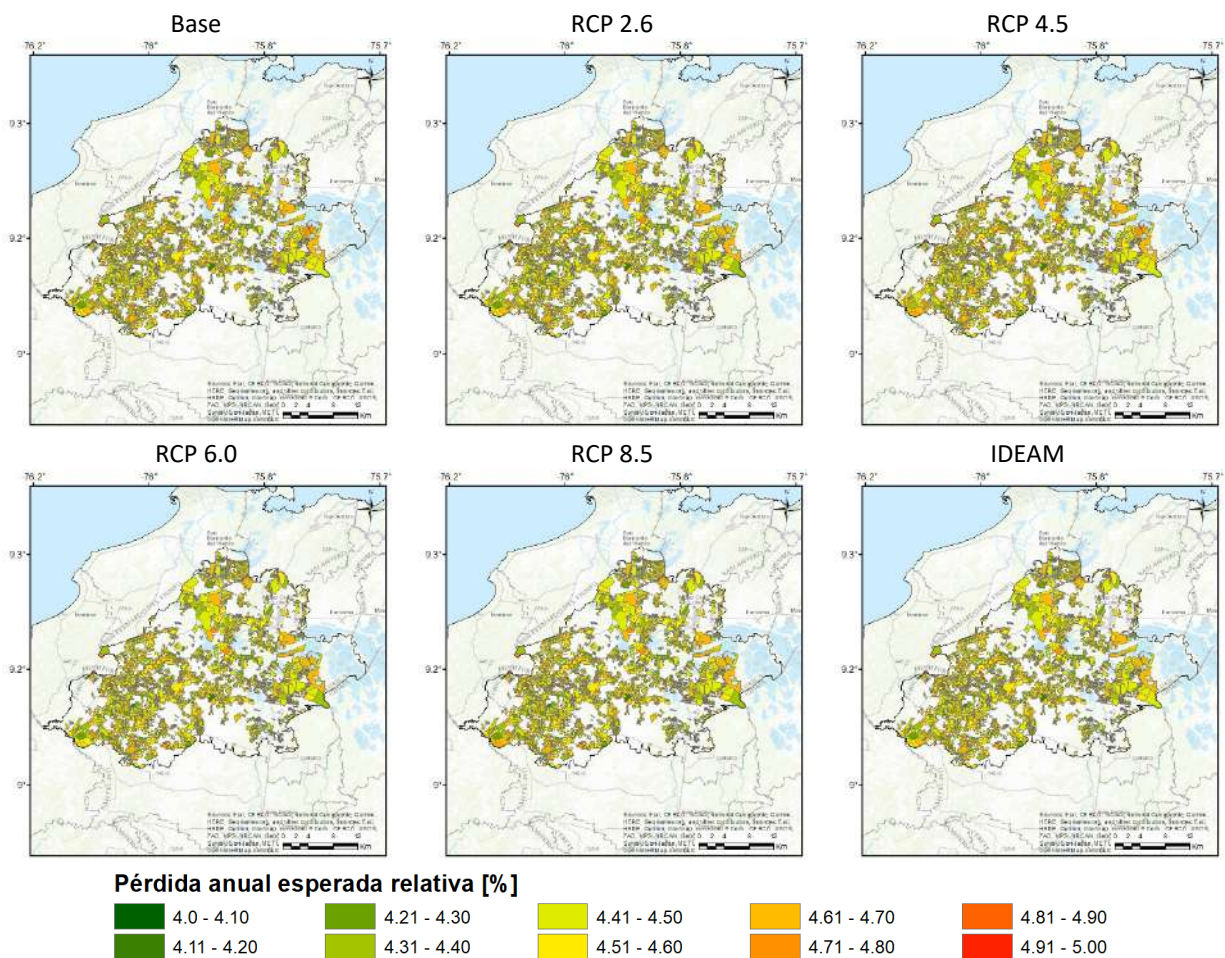


Figura 45. Maíz blanco tradicional – ciclo A. Llorca

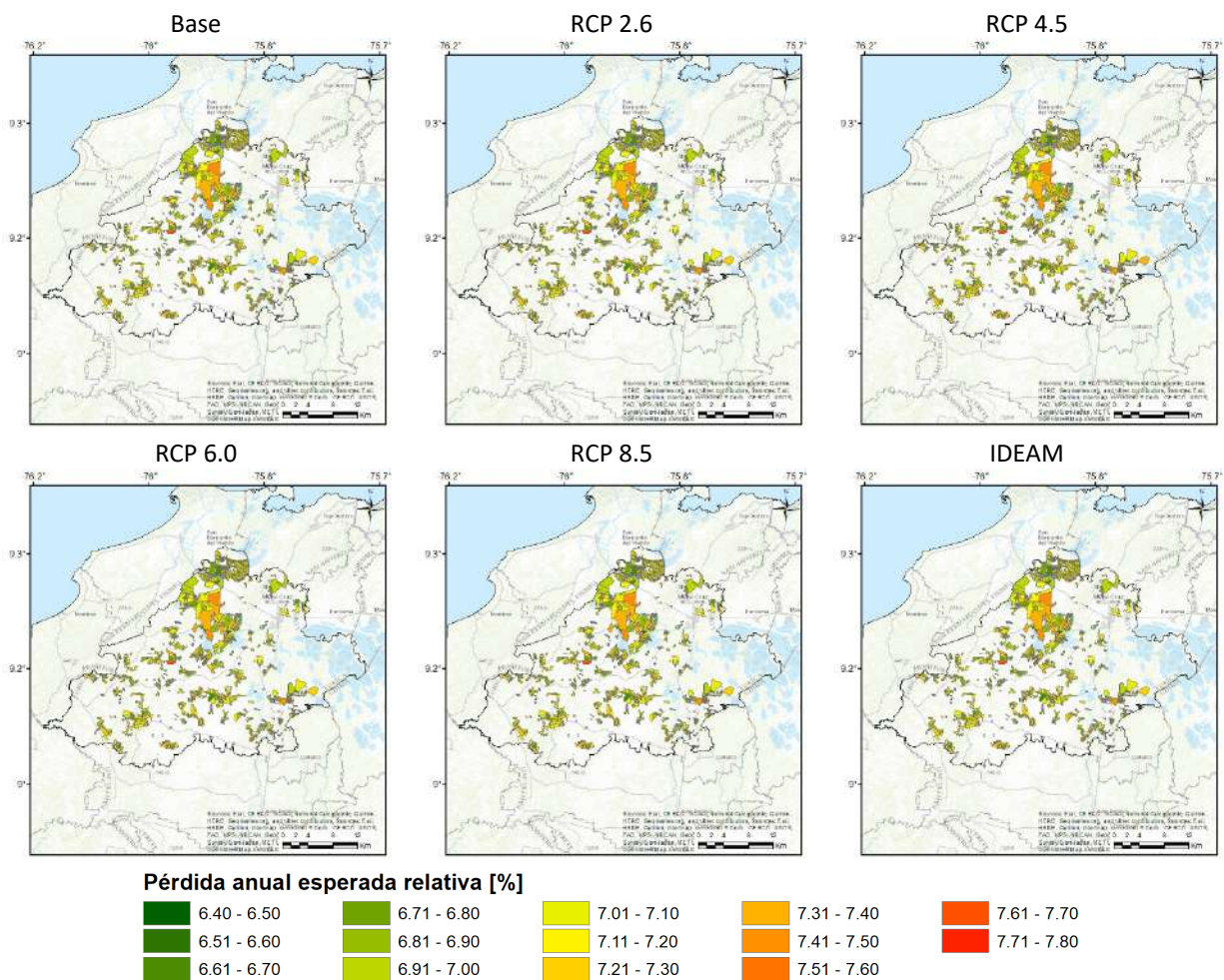


Figura 46. Maíz blanco tradicional – ciclo B. Lorica

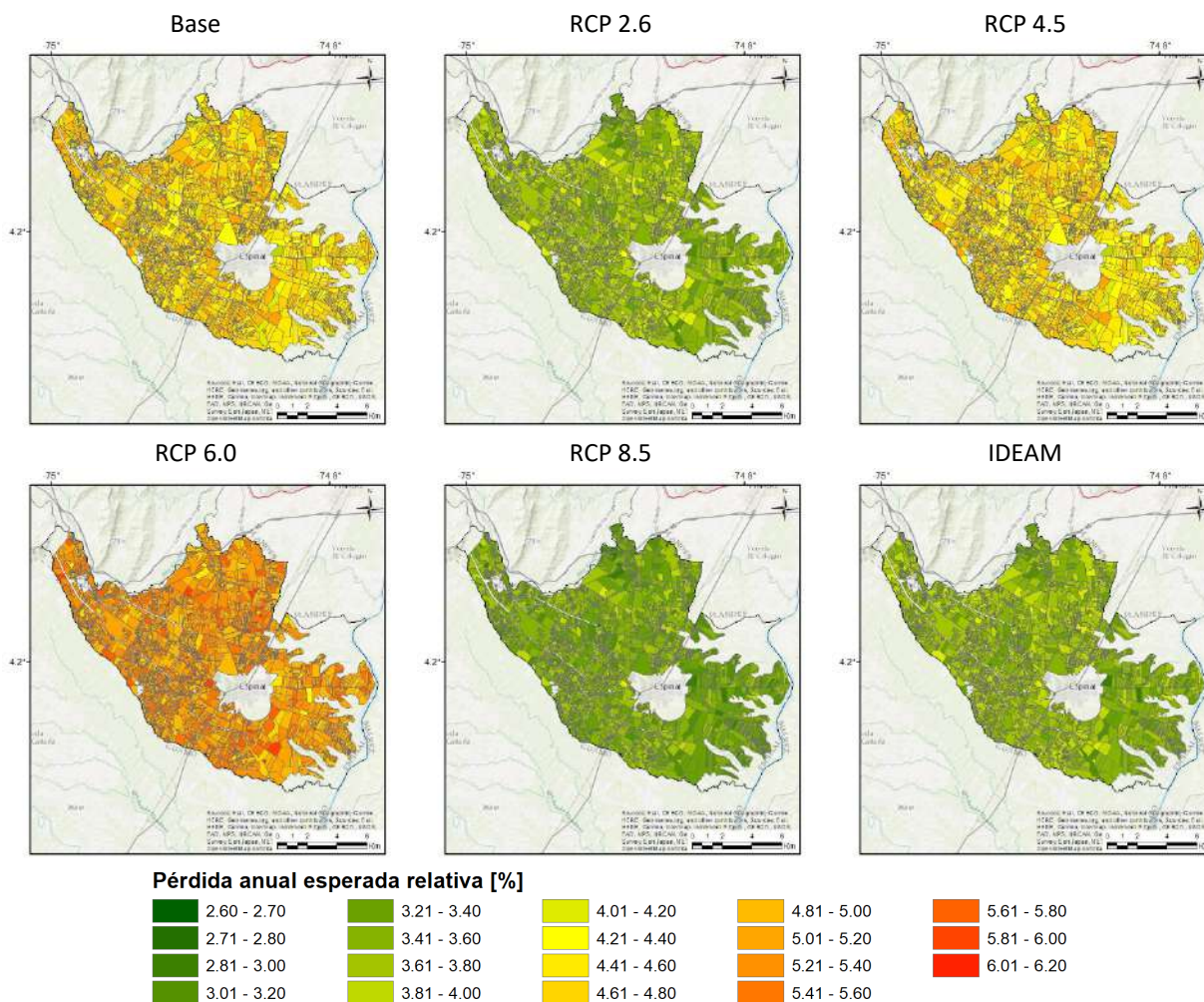


Figura 47. Arroz de riego – ciclo A. Espinal

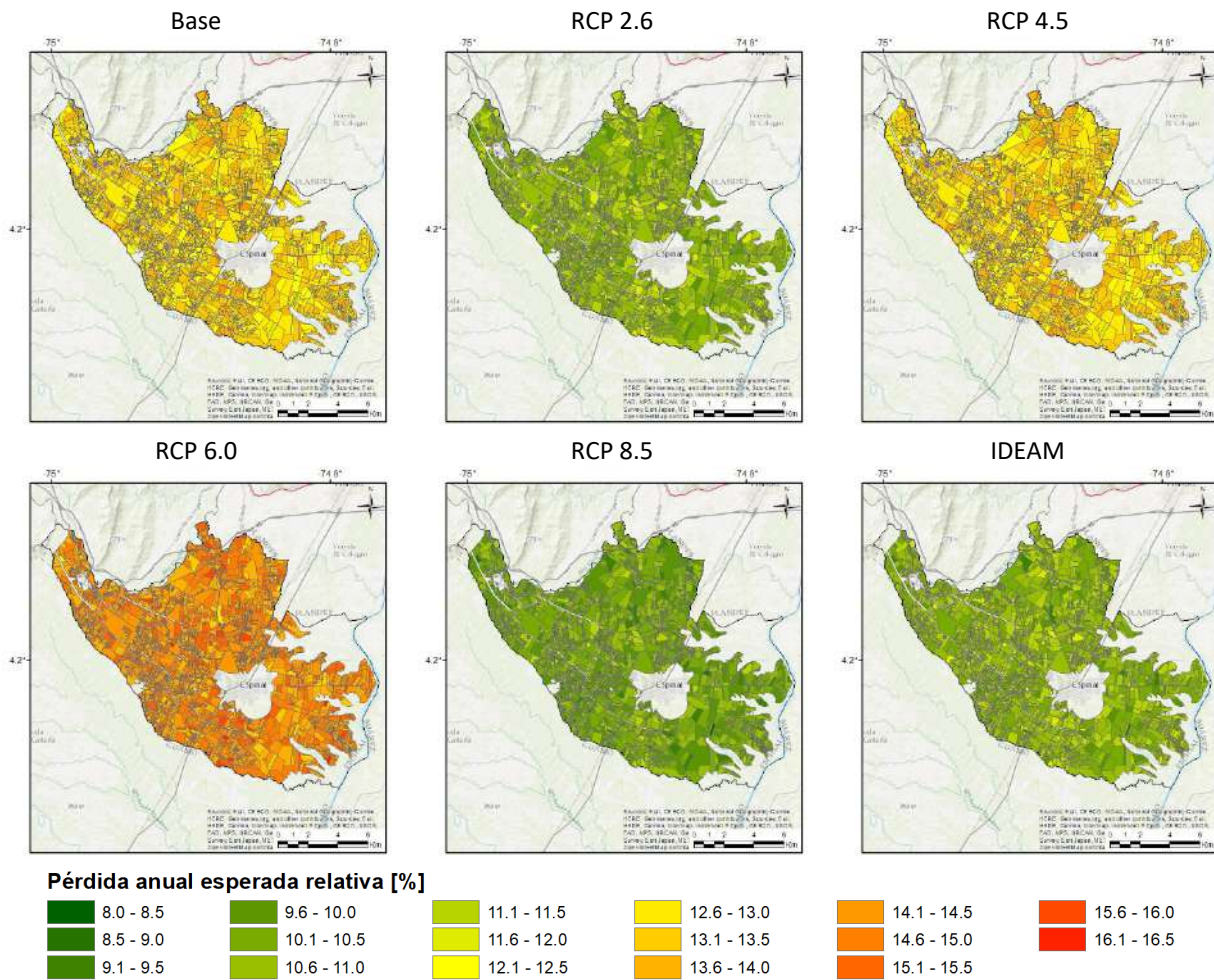


Figura 48. Arroz de riego – ciclo B. Espinal

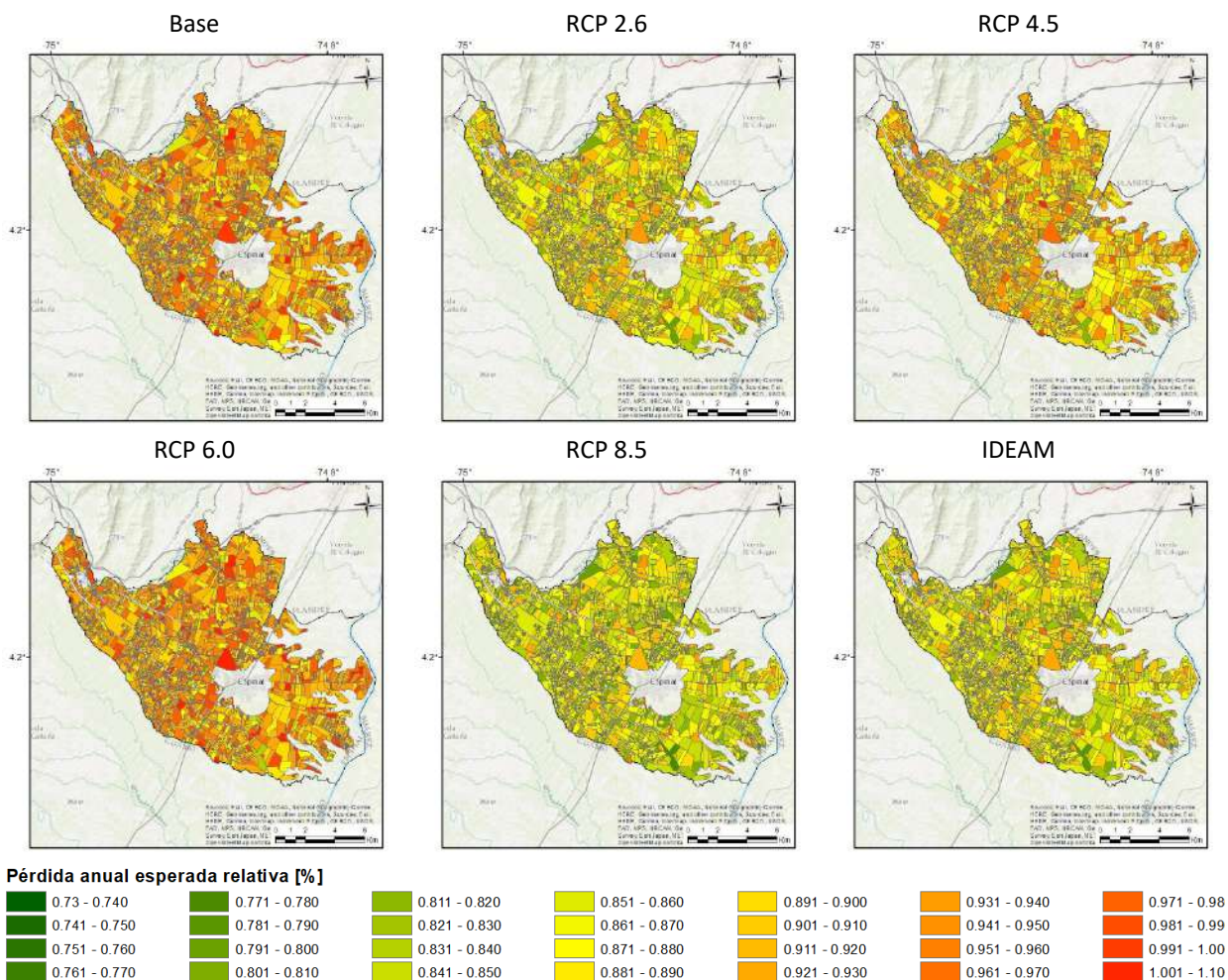


Figura 49. Maíz amarillo tecnificado – ciclo A. Espinal

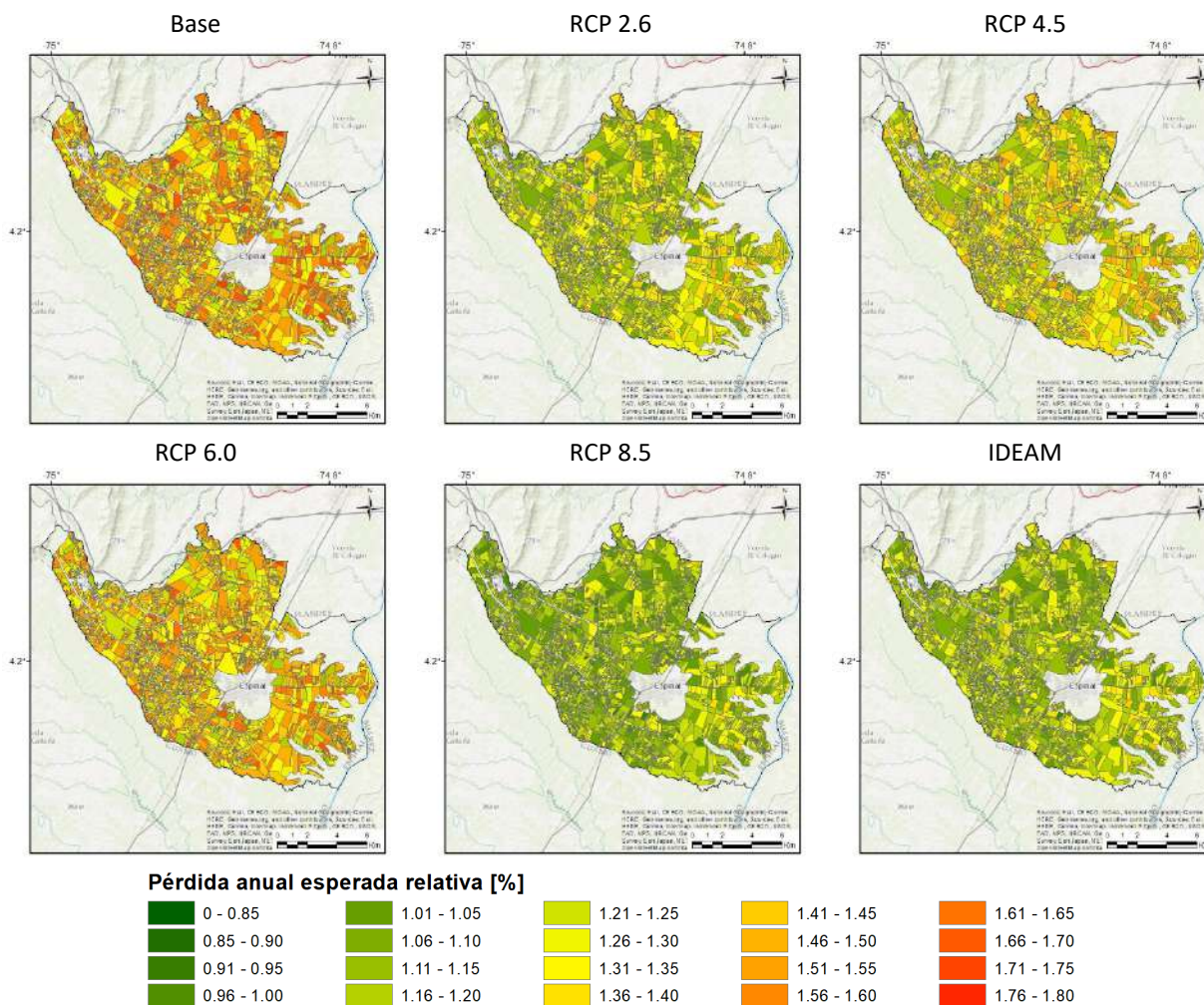


Figura 50. Maíz amarillo tecnificado – ciclo B. Espinal

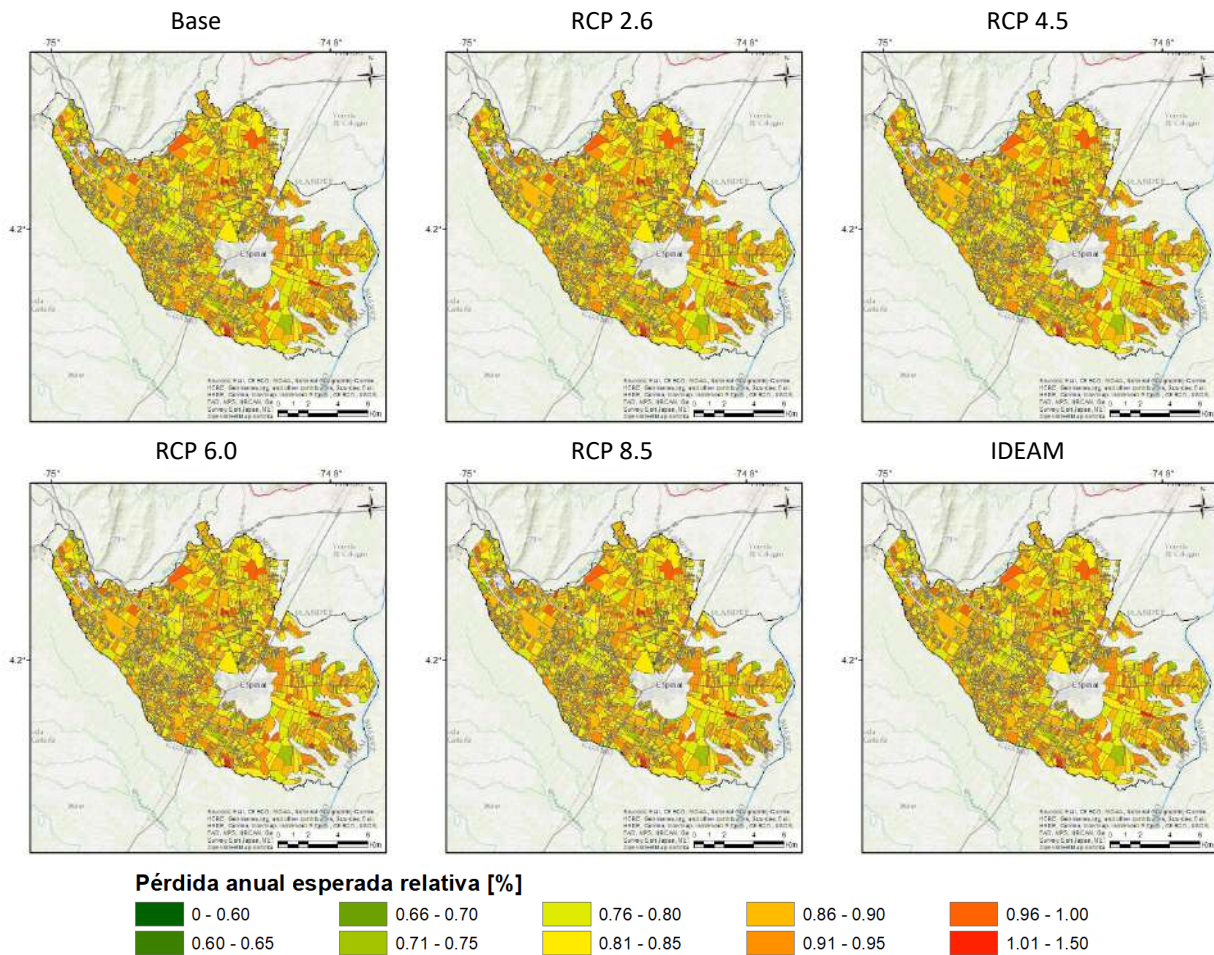


Figura 51. Maíz blanco tecnificado – ciclo A. Espinal

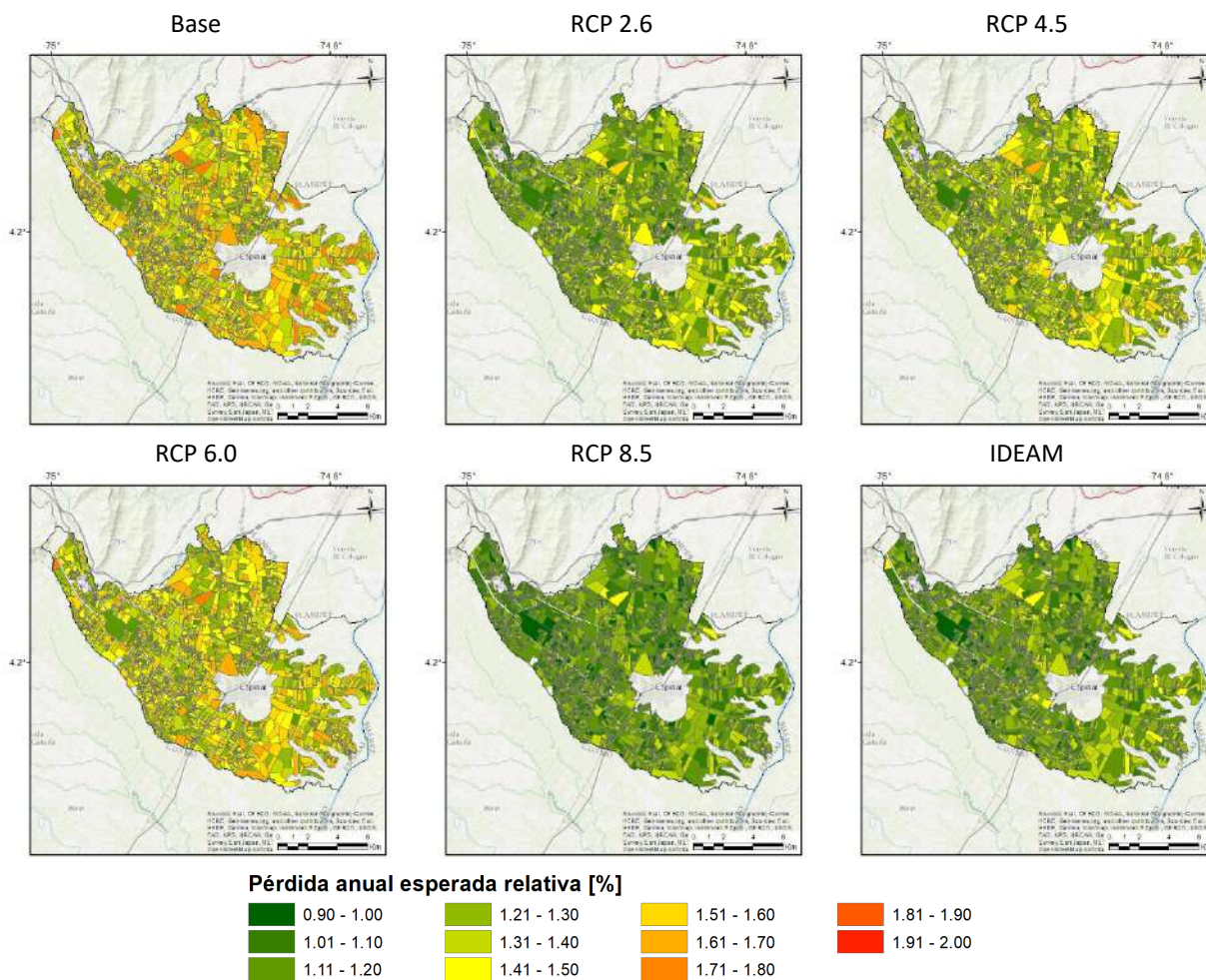


Figura 52. Maíz blanco tecnificado – ciclo B. Espinal

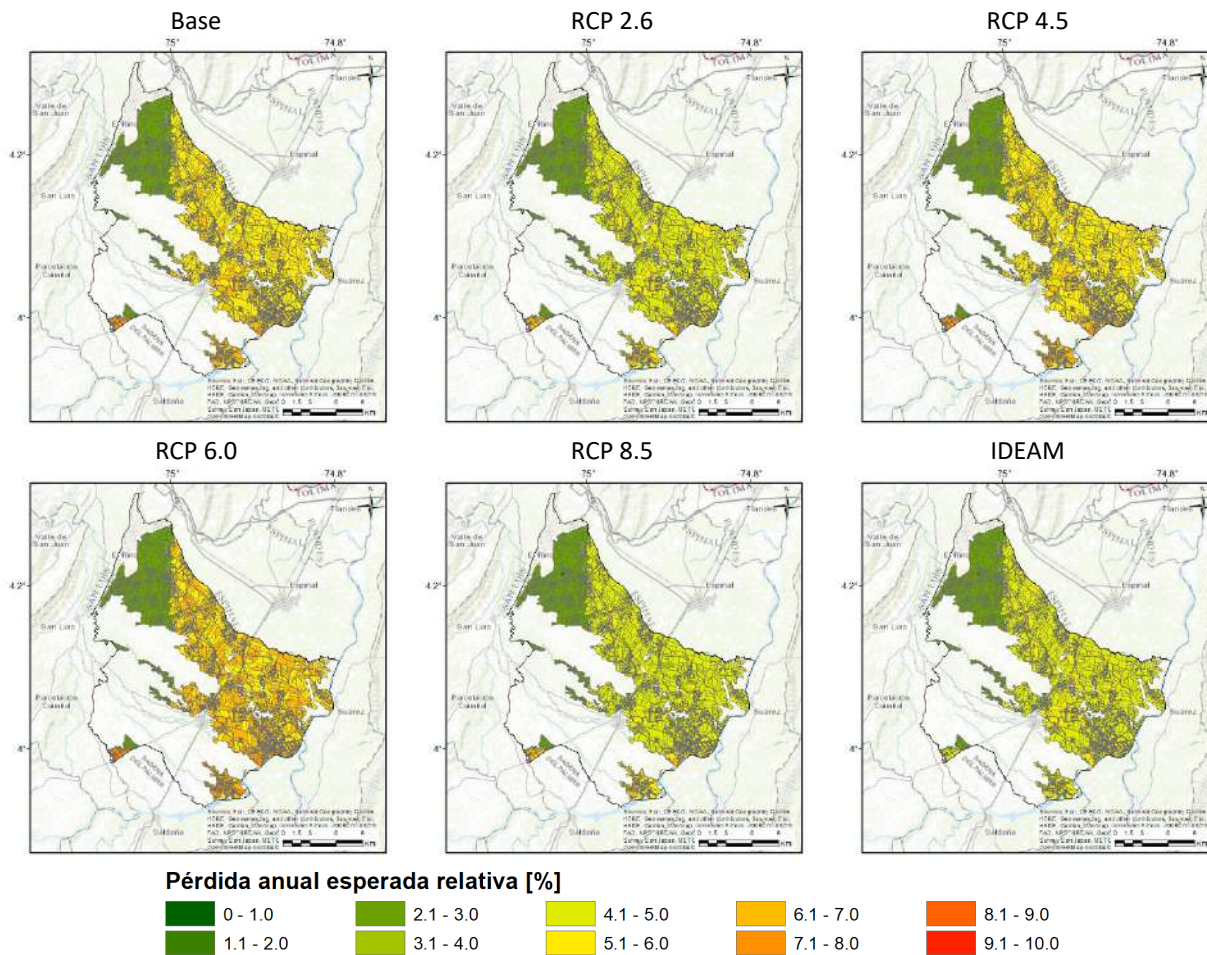


Figura 53. Arroz de riego – ciclo A. Guamo

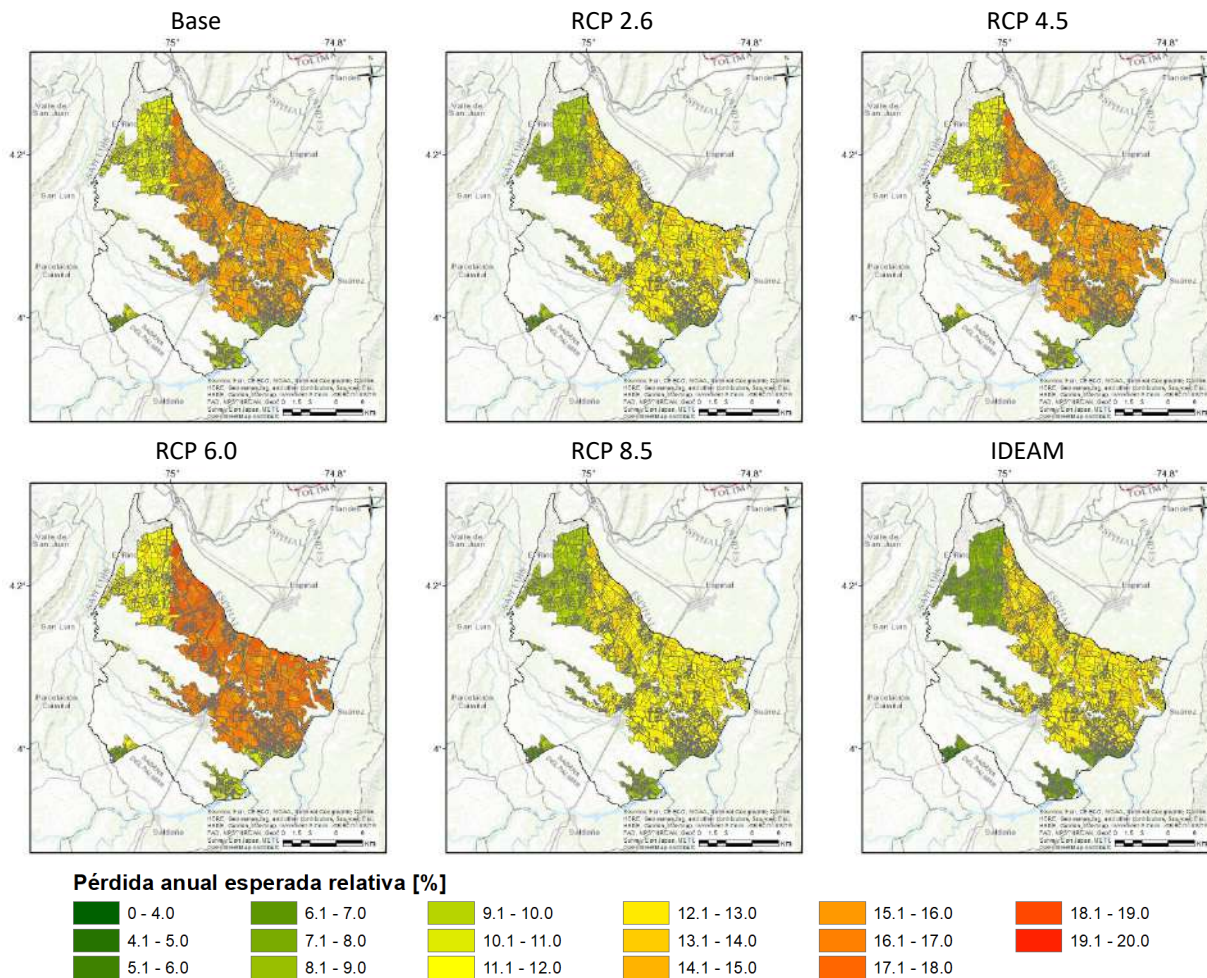


Figura 54. Arroz de riego – ciclo B. Guamo

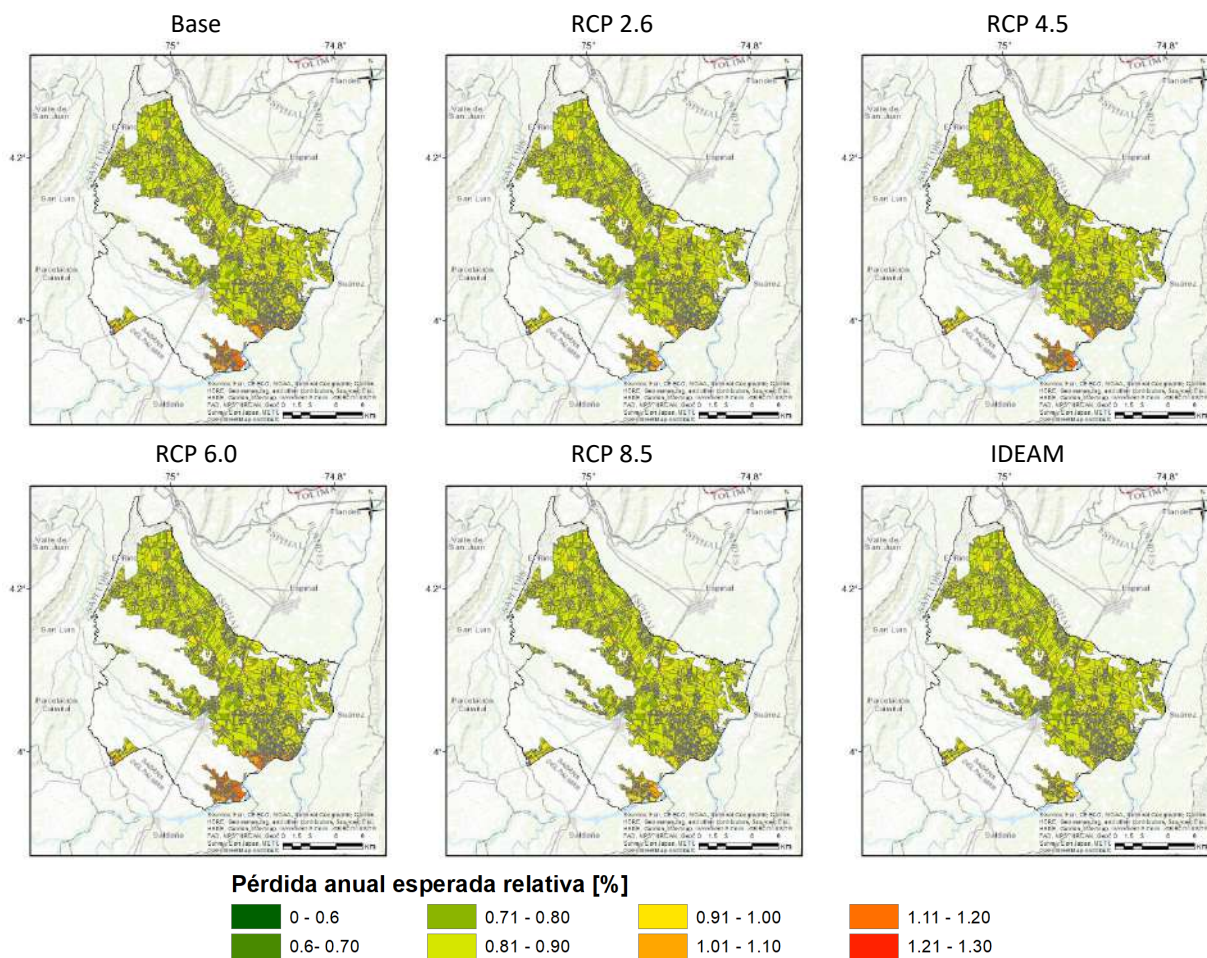


Figura 55. Maíz amarillo tecnificado – ciclo A. Guamo

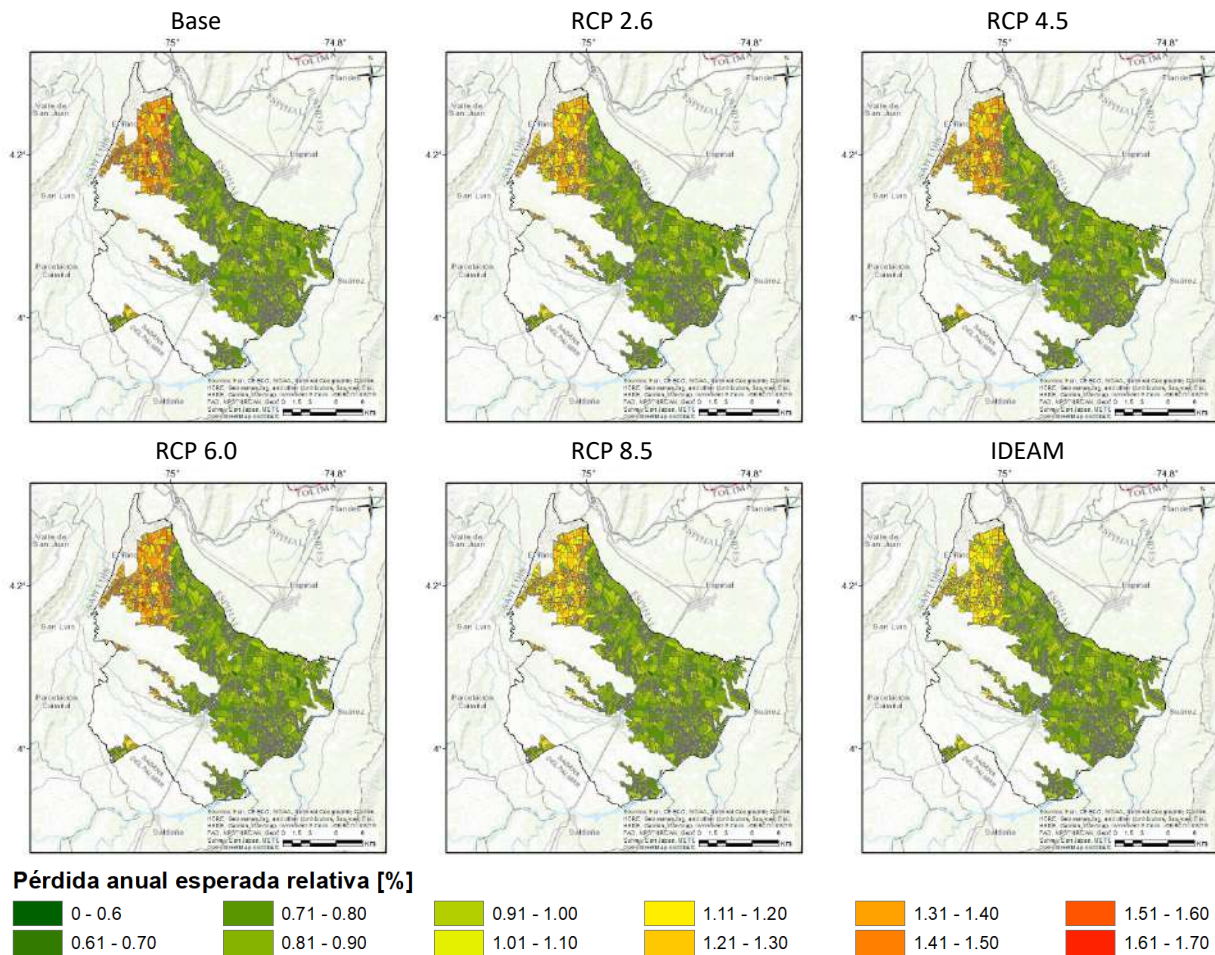


Figura 56. Maíz amarillo tecnificado – ciclo B. Guamo

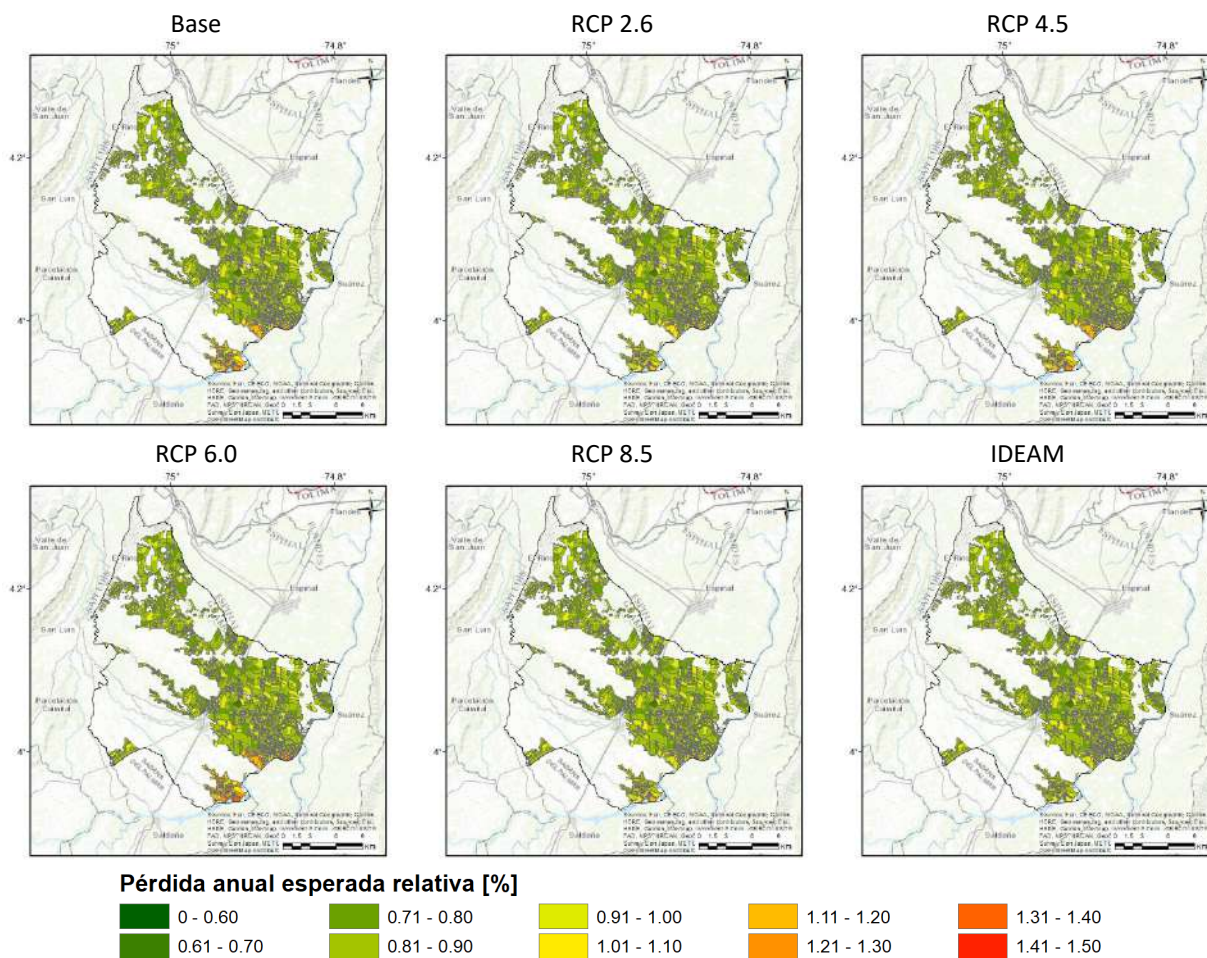


Figura 57. Maíz blanco tecnificado – ciclo A. Guamo

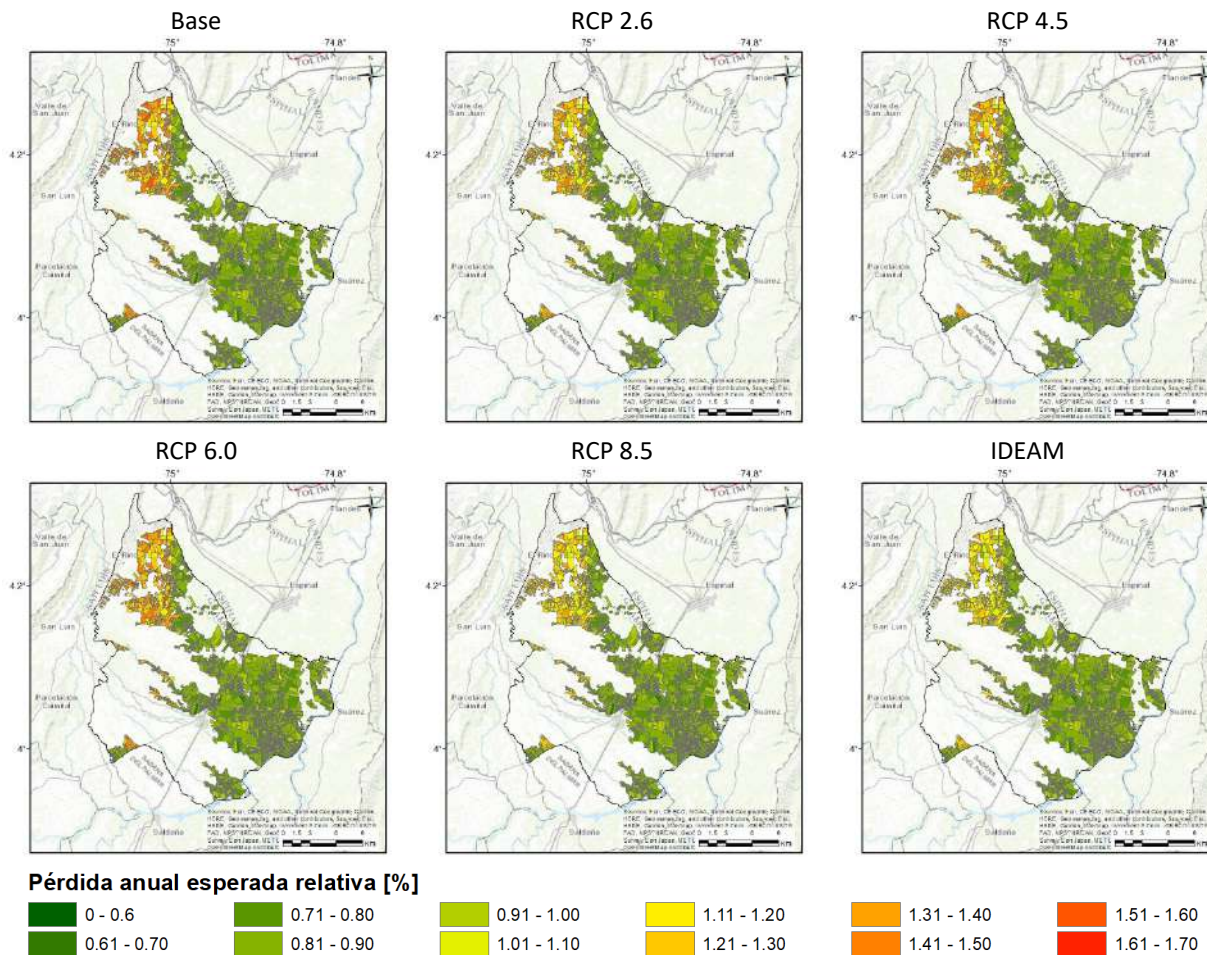


Figura 58. Maíz blanco tecnificado – ciclo B. Guamo

6 REFERENCIAS

- Steduto, P., Hsiao, T., Fereres, E., & Raes, D. (2012). Crop yield response to water (FAO Irrigation and Drainage Paper No. 66). Rome.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop requirements. Irrigation and Drainage Paper No. 56, FAO, (56), 300. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2010.12.001>
- Bello, C., Patiño, J., Almanza, E., Monroy, J., Steduto, P., Mejías, P., Raes, D., Fereres, E., & Boshell, J. (2013). Uso del modelo AquaCrop para estimar rendimientos para el cultivo de maíz en los departamentos de Córdoba, Meta, Tolima y Valle del Cauca. ISBN I3429S/1/08.13.
- Bernal, G. A., Escovar, M. A., Zuloaga, D., & Cardona, O. D. (2017). Agricultural Drought Risk Assessment in Northern Brazil: An Innovative Fully Probabilistic Approach. In V. Marchezini, B. Wiesner, S. Saito, & L. Londe (Eds.), *Reduction of Vulnerability to Disasters: from Knowledge to Action*. RiMa Ed., pp. 331–356
- Bernal, G., Rincon, D., Escovar, M.A. & Cardona, O. D. (2018). Drought Pro: Computer program for probabilistic drought risk assessment of crops and livestock systems.
- Bernal, G., Cardona, O.D., Marulanda, M., Carreño, M. L. (2021). Dealing with Uncertainty using Fully Probabilistic Risk Assessment for Decision Making. Chapter 14 in: Eslamian, S., & Eslamian, F. (Eds): *Handbook of Disaster Risk Reduction for Resilience*. Springer Nature. In press.
- FAO. (2017). AquaCrop training handbooks Book I Understanding AquaCrop. Rome.
- FAO. (2020). Harmonized World Soil Database. Recuperado de <http://www.fao.org/soils-portal/data-hub/soil-maps-and-databases/harmonized-world-soil-database-v12/en/>
- FEDEARROZ. (2023). PRECIOS DEL SECTOR ARROCERO. Recuperado de <https://www.fedearroz.com.co/es/fondo-nacional-del-arroz/investigaciones-economicas/estadisticas-arrocero/precios-del-sector-arrocero/>
- FENALCE. (2023). Precios nacionales al productor. Recuperado de <https://fenalce.co/estadisticas/>
- FINAGRO. (2023). Yuca. Recuperado de <https://www.finagro.com.co/yuca>
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi – IGAC. (2023). Bases de datos catastrales. Recuperado de <https://geoportal.igac.gov.co/contenido/datos-abiertos-catastro>
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi – IGAC. (2023b). Mapas de Clasificación de las Tierras por su Vocación de Uso. Recuperado de <https://geoportal.igac.gov.co/contenido/datos-abiertos-agrologia>
- Mishra, A. K., & Singh, V. P. (2010). A review of drought concepts. *Journal of Hydrology*, 391(1–2), 202–216. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.07.012>
- Poppe, M. (2016). Simulating the water footprint of woodies in AquaCrop and Apex. University of Twente.
- Raes, D. (2009). The ETo Calculator Table of Contents - Reference Manual, 1–38.
- Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T. C., & Fereres, E. (2011). FAO cropwater productivity model to simulate yield response to water AquaCrop. In *Reference Manual of AQUACROP* (p. 56).
- Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T., & Fereres, E. (2017). Calculation Procedures. In *AquaCrop Version 6.0 Reference Manual*. Rome: FAO.

Tsakiris, G., Pangalou, D., & Vangelis, H. (2007). Regional drought assessment based on the Reconnaissance Drought Index (RDI). *Water Resources Management*, 21(5), 821–833. <https://doi.org/10.1007/s11269-006-9105-4>

Unidad de Planificación Rural Agropecuaria - UPRA. (2022). Evaluaciones Agropecuarias Municipales – EVA 2022. Recuperado de <https://upra.gov.co/es-co/Paginas/eva.aspx>

Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., & López-Moreno, J. I. (2010). A multiscalar drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of Climate*, 23(7), 1696–1718. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1>

Wilhite, D. A., & Glantz, M. H. (1985). Understanding the Drought Phenomenon: The Role of Definitions. *Water International*, 10(3), 111–120.