

Contribución de la **Unión Europea**
complementaria al **Proyecto de Irrigación**
Tecnificada para pequeños y medianos
productores y productoras



ESCUELA NACIONAL
DE IRRIGACIÓN
PARCELARIA

**PROGRAMA ASESORA / ASESOR EN RIEGO INTEGRAL
PARCELARIO**
**CURSO DE ELABORACIÓN DE DIAGNÓSTICOS INTEGRALES
EN TERRITORIOS BAJO RIEGO**



El Chaupi – Cantón Mejía – Pichincha – Ecuador

**Módulo 3. Diseño y Elaboración de un Diagnóstico Integral en
Etapa de Factibilidad**

**Análisis Clima – Suelo – Agua-
Cultivos (Factibilidad)**

Andrea Vera Bustamante

2020



Contenido

I. RESULTADOS DE APRENDIZAJE.....	2
II. INTRODUCCIÓN	3
III. DESARROLLO DE LA UNIDAD	4
CAPÍTULO 1. ¿CÓMO ANALIZAMOS LA INFORMACIÓN PARA REALIZAR UN DIAGNÓSTICO CLIMÁTICO EN UN ÁREA DE RIEGO?	4
Tema 1. ¿Qué debo considerar inicialmente para afinar la estimación del balance hídrico?.....	5
Tema 2. ¿Cómo proceso la información climática?	6
Tema 3. Preparación de datos climáticos para el uso de plataformas informáticas que facilitan el cálculo del balance hídrico	16
CAPÍTULO 2. ¿CÓMO SE REALIZA UNA CARACTERIZACIÓN HIDROFÍSICA DEL SUELO?	21
Tema 1. ¿Cuál es la metodología para determinar características hidroffísicas del suelo que intervienen en el balance hídrico?	21
Tema 2. Preparación de datos de suelo para el uso de plataformas informáticas que facilitan el cálculo del balance hídrico	28
CAPÍTULO 3. ¿COMO DETERMINAR LOS REQUERIMIENTOS HÍDRICOS DE LOS CULTIVOS?	31
Tema 1. ¿Qué es la evapotranspiración del cultivo (ETc)?	31
Tema 2. ¿Cómo cuantificar el balance hídrico a partir de los requerimientos hídricos de los cultivos?	37
IV. BIBLIOGRAFÍA	40
V. GLOSARIO.....	41
VI. ANEXOS.....	42
Indicadores del suelo para identificar su capacidad productiva y de riego.	42



I. RESULTADOS DE APRENDIZAJE

Al finalizar el análisis de esta guía el participante será capaz de:

- Procesar información climática proveniente de estaciones instaladas en territorio con la finalidad de afinar los datos para el cálculo de balance hídrico y disponibilidad de agua con énfasis en riego parcelario.
- Aplicar metodologías concretas para el levantamiento de información en campo que permita caracterizar las propiedades hidrofísicas del suelo relevantes para el cálculo de la disponibilidad de agua en las áreas agrícolas de interés.
- Aplicar herramientas informáticas de libre acceso para el procesamiento de información primaria: climática y de suelo y para el cálculo de balance hídrico con énfasis en riego parcelario.



II. INTRODUCCIÓN

El objetivo de entender la relación clima – suelo – agua – cultivos a través de la información: climática, hidrológica y de suelos, proveniente de instrumentos instalados en territorio y técnicas aplicadas en campo, es promover con mayor certeza el diseño, planificación y desarrollo de proyectos agrícolas bajo riego, ya que nada reemplaza a un dato medido, toda estimación del valor de una variable meteorológica, hidrológica o agronómica ya sea por interpolación de valores cercanos o mediante el uso de imágenes satelitales u otro método, será inferior a una medición directa efectuada correctamente.

Esta guía tiene por finalidad revisar los procedimientos para levantar y tratar información proveniente de estaciones meteorológicas e hidrológicas a escala local y recopilar información de suelos en campo, que son fundamentales para calcular la disponibilidad de agua en un sistema agrícola de interés. Esta información asociada al requerimiento o demanda de agua de los cultivos que se prevé sean el objeto de producción, permitirá proponer las mejores alternativas para consolidar un proyecto integral de riego parcelario y monitorear a futuro todas las actividades agrícolas asociadas con mayor efectividad.

En esta guía encontrarán los procedimientos para levantar, procesar y analizar información primaria sobre los elementos geográficos y estadísticos: climático, suelos e hidrológico, identificados en una cuenca de interés (prefactibilidad), con la finalidad de afinar los resultados del balance hídrico, por tanto, se presentan ejemplos que contemplan un número de elementos geográficos y estadísticos, a fin que faciliten el desarrollo de los contenidos de la guía.



III. DESARROLLO DE LA UNIDAD

CAPÍTULO 1. ¿CÓMO ANALIZAMOS LA INFORMACIÓN PARA REALIZAR UN DIAGNÓSTICO CLIMÁTICO EN UN ÁREA DE RIEGO?

Caso Junta de Riego El Mate

La Junta de Riego “El Mate”, ubicados en el cantón Santa Lucía, provincia Guayas – Ecuador, pudieron mejorar su sistema de riego parcelario para el cultivo de arroz, gracias al balance hídrico realizado con información representativa de la cuenca de aporte al área agrícola de interés.

Conocer que el caudal autorizado no era suficiente para mantener sus cultivos de arroz, les permitió participar en un proyecto de inversión que mejoró la eficiencia de su sistema, la calidad de su cultivo, su producción y sobre todo pudieron proyectar su crecimiento con agricultores y microempresarios.

La asistencia de la asesora en riego integral parcelario y sus conocimientos en el manejo de herramientas de información geográfica y análisis del balance hídrico, a partir de información secundaria, permitió obtener la información deseada. Sin embargo, la asesora ha planteado recopilar información primaria para profundizar y detallar el análisis del balance hídrico en la zona agrícola del sistema de riego.

Para ello, se ha planteado el análisis de variables indispensables en el balance hídrico como: la precipitación, la evapotranspiración de los cultivos y características de suelos. Todas estas variables requieren elementos estadísticos o levantamiento de información en campo, que posteriormente hay que procesar y analizar utilizando algunas herramientas informáticas.

Una vez identificada la situación hídrica en la cuenca de aporte al área agrícola de interés, las etapas para afinar el balance hídrico comprenden: 1) agrupar los elementos estadísticos de los cuales se debe recolectar información primaria 2) selección de las metodologías adecuadas para el levantamiento y tratamiento de información primaria y 3) procesamiento y análisis de la información primaria.

La recopilación de información y su análisis debe mantener como referencia las componentes del balance hídrico, expresadas en la siguiente tabla.

Tabla 1. Componentes básicos del balance hídrico en una cuenca hidrográfica

Ingresos	Egresos	Consumos (Egresos)	Reingresos
Precipitación	Evapotranspiración Referencia	Evapotranspiración de Cultivo	Agua tratada
	Infiltración		
	Escorrentía		
	Trasvases		

Cada componente requiere para su cálculo de varios elementos estadísticos, y a su vez cada elemento estadístico debe contar con un periodo mínimo de registro de datos y una resolución temporal ajustada a la disponibilidad de información. Se recomienda la resolución diaria o mensual para el cálculo del balance hídrico con énfasis en riego parcelario. A continuación, se detallan las particularidades de cada componente:



Tema 1. ¿Qué debo considerar inicialmente para afinar la estimación del balance hídrico?

Ingresos de agua al sistema

Tabla 2. Elementos estadísticos que contribuyen a la obtención de los ingresos de agua a la cuenca de aporte

Elemento	Información estadística observada	Escala temporal	Periodo de registro mínimo	Fuente
Precipitación	Lluvia	Diaria o mensual	10 años	Estaciones meteorológicas dentro de la cuenca o de cuencas fisiográficamente homogéneas determinadas en la prefectibilidad
Caudal	Caudal			Estaciones hidrológicas en la cuenca o en el sitio de cierre de la cuenca determinadas en la prefectibilidad. Caudal a la entrada del sistema a través de mediciones directas.

En la guía “Descripción general de la infraestructura de riego” de la ENIP, encontrarás métodos de medición de caudal en sistemas de riego, que te ayudarán a determinar este ingreso de agua en el balance.

Egresos de agua al sistema

Tabla 3. Elementos estadísticos que contribuyen a la obtención de los egresos de agua en la cuenca de aporte.

Elemento	Información estadística observada	Escala temporal	Periodo de registro mínimo	Fuente
Evapotranspiración de referencia	Temperatura del aire	Diaria o mensual	10 años	Estaciones meteorológicas dentro de la cuenca o de cuencas fisiográficamente homogéneas determinadas en la prefectibilidad.
	Radiación solar			
	Velocidad del viento			
	Presión atmosférica			
Suelo	Textura	Depende del cambio en el uso del suelo	1 muestreo	Calicatas, prueba en campo y análisis de laboratorio
	Estructura			
	Profundidad efectiva			
	Pedregosidad			
	Densidad aparente			
	Porosidad			
	Contenido de materia orgánica			
	Velocidad de infiltración			



Consumos de agua en el sistema

El consumo de agua en el sistema se refiere al uso de agua por los cultivos. De forma general esta información también es una pérdida de agua en el sistema, que bien se puede considerar un egreso, sin embargo, es necesario especificar como a través del coeficiente de cultivo la evapotranspiración de referencia se convierte en una variable específica de consumo de agua que responde al tipo o los tipos de cultivos presentes en el área agrícola de interés.

Tabla 4. Elementos estadísticos que contribuyen a la obtención del consumo de agua en la cuenca de aporte.

Elemento	Información estadística observada	Escala temporal	Periodo de registro mínimo	Fuente
Evapotranspiración de cultivos	Kc	Etapas de desarrollo	Ciclo completo de los cultivos de interés	Estaciones agrometeorológicas con lisímetros. Estudios de Kc

Reingreso de agua en el sistema

En el caso de reingreso de agua al sistema, la principal consideración debe ser la calidad del agua, ya que el sistema de riego debe garantizar la salud y calidad de su producción.

Tabla 5. Elementos estadísticos que contribuyen a la obtención de la calidad de agua que ingresa a la cuenca de aporte.

Elemento	Información estadística observada	Escala temporal	Periodo de registro mínimo	Fuente
Calidad de agua	Parámetros de las tablas 3 y 4 del Anexo 1, Libro VI del Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente, acuerdo ministerial 097A, publicadas en el Registro Oficial Suplemento 387 de 4 de noviembre de 2015. http://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2018/05/Acuerdo-097.pdf .	Mensual	Ciclo completo de los cultivos de interés	Pruebas de campo y análisis de laboratorio

Los criterios y metodología para determinar la calidad de agua en un sistema de riego, es un tema tratado en la guía “Diagnóstico ambiental de las fuentes de agua en un sistema de riego”.

Tema 2. ¿Cómo proceso la información climática?

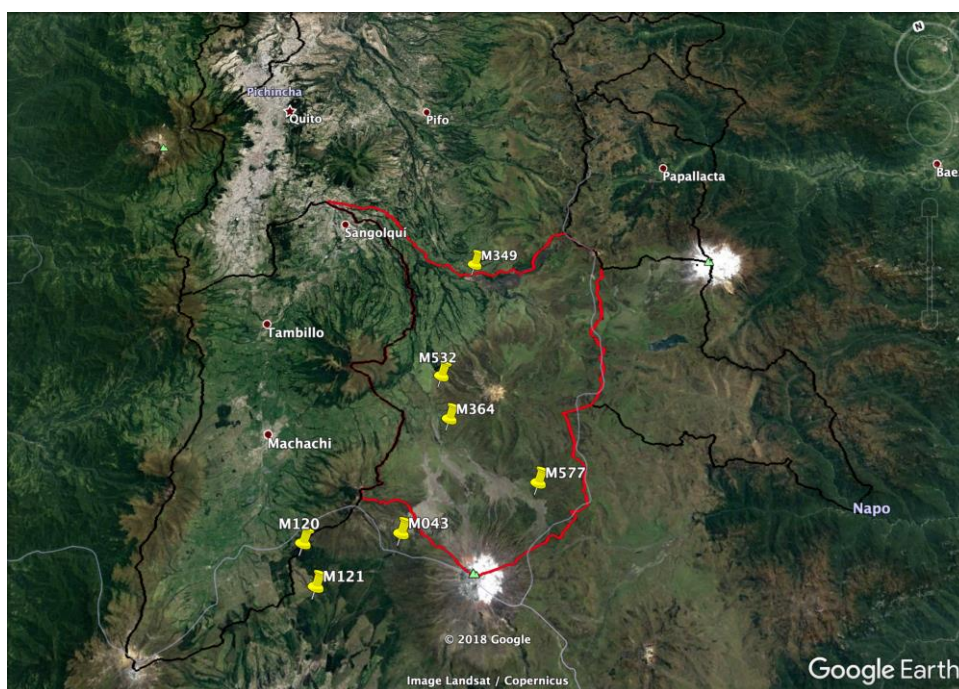
La selección de las estaciones climáticas e hidrométricas de referencia para el levantamiento de información del diagnóstico debe mantener las siguientes consideraciones:

1. Se seleccionan estaciones ubicadas dentro de un cuadrante externo al área de influencia, en función a la disponibilidad y contenido de información. Para definir la magnitud de tal cuadrante, se omiten criterios que sugieran distancias referenciales fuera de los bordes de la cuenca debido a la baja densidad de

estaciones y a las características de la topografía. Criterios como la homogeneización de los datos climáticos de un grupo de estaciones sirve para descartar a las estaciones meteorológicas que no se correlacionan con el comportamiento climático de la cuenca de interés.

2. Se priorizan las estaciones con registros de más de 10 años de datos, sin embargo, no se descartan estaciones con registros relativamente cortos sin antes tener conocimiento preciso acerca de la calidad de la información y de su importancia geográfica.
3. La selección de las estaciones prioriza aquellas que describen patrones similares a los de las estaciones vecinas. Este proceso constituye el primer filtro para identificar errores en los datos. Las herramientas para este análisis son diversas, todas ellas basadas en correlaciones entre sí.

Ejemplo: Para ejemplar el proceso de tratamiento primario se ha seleccionado a la cuenca del río Pita, ubicada en los cantones Quito, Mejía y Rumiñahui de la provincia – Ecuador.



Fuente: Google Earth. Elaboración: Vera, A. 2019

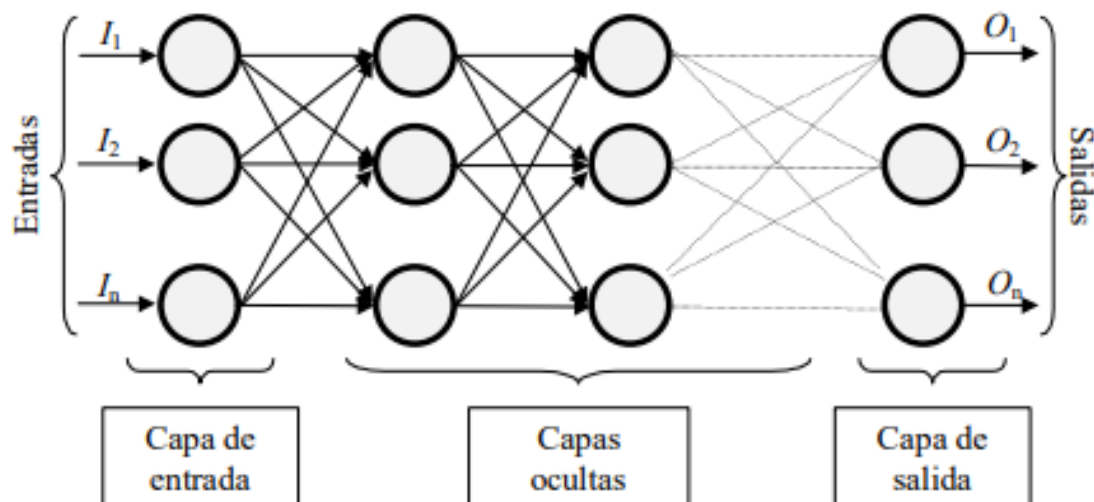
Figura 1. Selección de estaciones para el análisis climático de la cuenca del río Pita

Antes de iniciar el análisis climático se debe seleccionar una herramienta informática que facilite el análisis estadístico, esta puede ser la aplicación EXCEL o aplicaciones más complejas como Jupyter Notebook¹, que utilizan el concepto de “redes neuronales artificiales (RNA)” para tratar la información climática.

Las redes neuronales artificiales (RNA) aplicadas a la meteorología se utilizan para completar las series cronológicas de datos, a través del entrenamiento con series de datos completas de estaciones altamente correlacionadas.

¹ Enlace para descarga <https://www.anaconda.com/distribution/>

Las redes neuronales artificiales son modelos estadísticos que permiten buscar la combinación de parámetros que mejor se ajustan a un determinado problema. En el lenguaje propio, encontrar la combinación que mejor se ajusta es "entrenar" la red neuronal. Una red ya entrenada se puede usar luego para hacer predicciones o clasificaciones, es decir, para "aplicar" la mejor combinación.



Fuente: https://www.fro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/quimica/5_anio/orientadora1/monograias/match-redesneuronales.pdf

Figura 2. Esquema de una red neuronal conectada

Entre las aplicaciones más comunes de las RNA están: el reconocimiento de patrones, regresiones no lineales, procesamiento de señales, modelos financieros, aproximación de funciones, control, predicción de series de tiempo, etc. Una de las ventajas más relevantes que presentan las RNA sobre los modelos estadísticos tradicionales radica en que el tipo de restricciones que imponen las redes son menos rigurosas.

Metodología para aplicar el diseño de la RNA a una serie de datos climáticos

Paso 1. Constitución de un grupo de estaciones

La recopilación de datos inicia con la solicitud de información de las estaciones identificadas en el área de influencia a la cuenca de interés. Oficialmente el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI).

Puede ser que en el territorio de interés existan estaciones meteorológicas e hidrológicas instaladas por instancias académicas, públicas y/o privadas, como: universidades, empresas de agua potable, empresas hidroeléctricas, etc. Los actores locales de la organización de riego pueden ser la referencia para identificar estaciones que cubren objetivos locales.

Las estaciones seleccionadas para el análisis de datos son las que se encuentran dentro de la cuenca y en un área de influencia que contempla una franja altitudinal similar a la cuenca de interés. Figura 1.



Ejemplo: Las siete estaciones seleccionadas para la caracterización climática (se observan en la figura 1 y tabla 6) de la cuenca hidrográfica del río Pita, cuentan con al menos 10 años de registros continuos. Una cantidad significativa de años para establecer tendencias sobre la cantidad de agua que cae, la estacionalidad, la evapotranspiración y el caudal disponible en los cuerpos de agua.

Tabla 6. Grupo de estaciones para el análisis climático de la cuenca del río Pita.

No	Id Estación	Nombre	Latitud (Grados)	Longitud (Grados)	Altitud m.s.n.m
1	M043	MARISCAL SUCRE INAMHI	-0,64	-78,49	3670
2	M120	COTOPAXI-CLIRSEN	-0,62	-78,57	3560
3	M121	EL REFUGIO-COTOPAXI	-0,66	-78,57	4800
4	M349	HDA.PINANTURA(LA COCHA)	-0,42	-78,35	3250
5	M364	LORETO PEDREGAL	-0,56	-78,42	3620
6	M532	RIO PITA-HDA.PEDREGAL	-0,52	-78,42	3600
7	M577	CAJAS PEDREGAL	-0,64	-78,37	3830

Fuente: INAMHI. Elaboración: Vera, A. 2019

El grupo de estaciones seleccionadas debe contar siempre con la información geográfica de ubicación: coordenadas, de preferencia geográficas, y altitud.

Paso 2. Relleno y homogeneización de datos

Cuando en un registro histórico falta un valor diario o mensual, o algunos valores diarios en un mes o algunos valores mensuales en un año, se generan “lagunas”. Esto significa, que algunos días o meses sin registros, van a afectar la ponderación mensual o anual, incluso el descarte del mes o año afectado.

Las “lagunas” dificultan el análisis de consistencia de las series cronológicas, por ende, existen métodos para rellenar las series de datos. El relleno de los valores mensuales debe considerar los siguientes principios:

- No eliminar sin motivo los errores de la estación, ni introducir otros errores,
- No perturbar de manera significativa el valor anual,
- Usar con precaución en aplicaciones de modelización.

El relleno de los valores mensuales faltantes por correlación y regresión con otra estación es el primer proceso de relleno que viene a la mente, pero es la mejor manera de introducir errores sistemáticos ajenos si la estación correlacionada tiene sus propios problemas.

Las redes neuronales artificiales (RNA) representan una técnica de modelación matemática, que intenta imitar el proceso de aprendizaje que ocurre en el sistema nervioso. Dependiendo del tipo de aplicación y sus características, se han desarrollado distintos tipos de redes neuronales, que se aplican en reconocimientos de voz, sistemas de control, procesamiento, clasificación de patrones en imágenes satelitales, determinación de variables climáticas, procesos químicos, y procesos de gestión.

La utilización de las RNA para el relleno de datos y predicción de fenómenos relacionados con el clima puede encontrarse en investigaciones de Clair y Ehrman (1998) y Zurada (1992), entre otros. También existen aplicaciones de RNA en hidrología para la predicción de los fenómenos de lluvia y escorrentía en cuencas con distintas características (Brahm y Varas, 2003; Shamseldin, 1997).



El objetivo de una RNA es entrenar sus nodos utilizando un conjunto de datos históricos de estaciones vecinas con periodo completos de datos, para así completar los datos faltantes de una estación en particular. La RNA minimiza el **error cuadrático medio** entre el valor de salida y el valor real esperado.

La plataforma Jupyter Notebook contiene varias **librerías** de alto nivel, escritas en Python para aplicar el concepto de redes neurales. Las librerías utilizadas para el tratamiento de datos son: Pandas (rutina para leer archivos), Seaborn (rutina para realizar correlaciones) y Keras (redes neuronales para relleno de datos). La librería Keras está enfocada en aplicar algoritmos automáticos de aprendizaje basados en asimilar representaciones de datos, como, por ejemplo, una serie temporal de datos meteorológicos.

El uso de la plataforma Jupyter y sus librerías se describen en el siguiente enlace: <http://gidahatari.com/ih-es/tutorial-completacion-datos-hidrologicos-inteligencia-artificial-python-keras?rq=keras>.

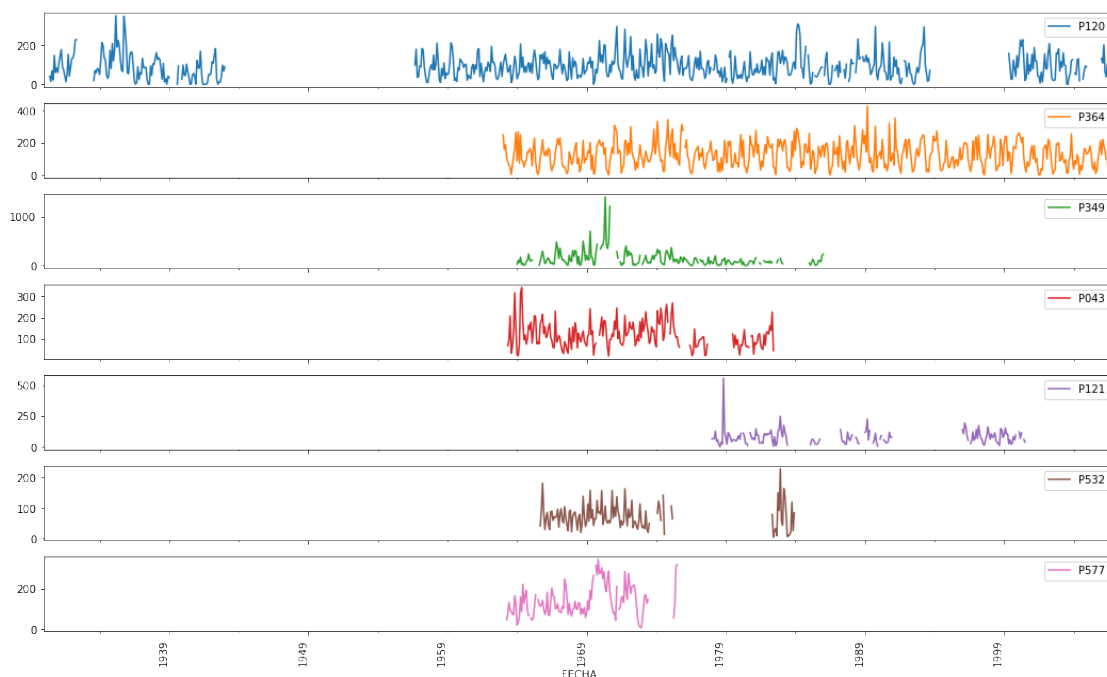
El proceso de relleno de datos en el entorno de la plataforma Jupyter Notebook, de forma general, se debe desarrollar de la siguiente manera:

1. *Instalación de la plataforma Jupyter Notebook*
2. *Instalación de librerías: Keras, Tensorflow, Nbimporter. Seguir el tutorial paquetes.docx disponible en el siguiente enlace: <https://github.com/paul19pv/RellenoDatosKeras>*
3. *Abrir el código de procesamiento y ejecutar las rutinas paso a paso, para el grupo de estaciones climáticas de interés. El código adaptable a cualquier grupo de estaciones es el archivo **Procesamiento.ipynb** disponible en el siguiente enlace: <https://github.com/paul19pv/RellenoDatosKeras>*

Procedimiento para relleno de datos:

Paso 2.1. El proceso de tratamiento de datos inicia con el ingreso de los registros mensuales históricos a la red neuronal.

Ejemplo: *Lectura de series históricas y lagunas en el periodo 1939 - 2006 de la variable precipitación de las siete estaciones seleccionadas para la caracterización climática de la cuenca hidrográfica del río Pita. La librería Pandas llama a los archivos Excel que contienen los registros mensuales de cada estación. Para ver la organización de los archivos revisar el siguiente enlace: <https://github.com/paul19pv/RellenoDatosKeras>. Para el tratamiento de datos de precipitación se reemplaza la M por P en el código que identifica a las estaciones con la finalidad de identificar a la variable que interviene en el proceso (P = Precipitación).*



Fuente: Plataforma Jupyter Notebook, 2019. Elaboración: Vera, A. 2019

Figura 3. Distribución de la serie de datos mensuales de la variable precipitación de las siete estaciones que son parte del análisis climático de la cuenca del río Pita.

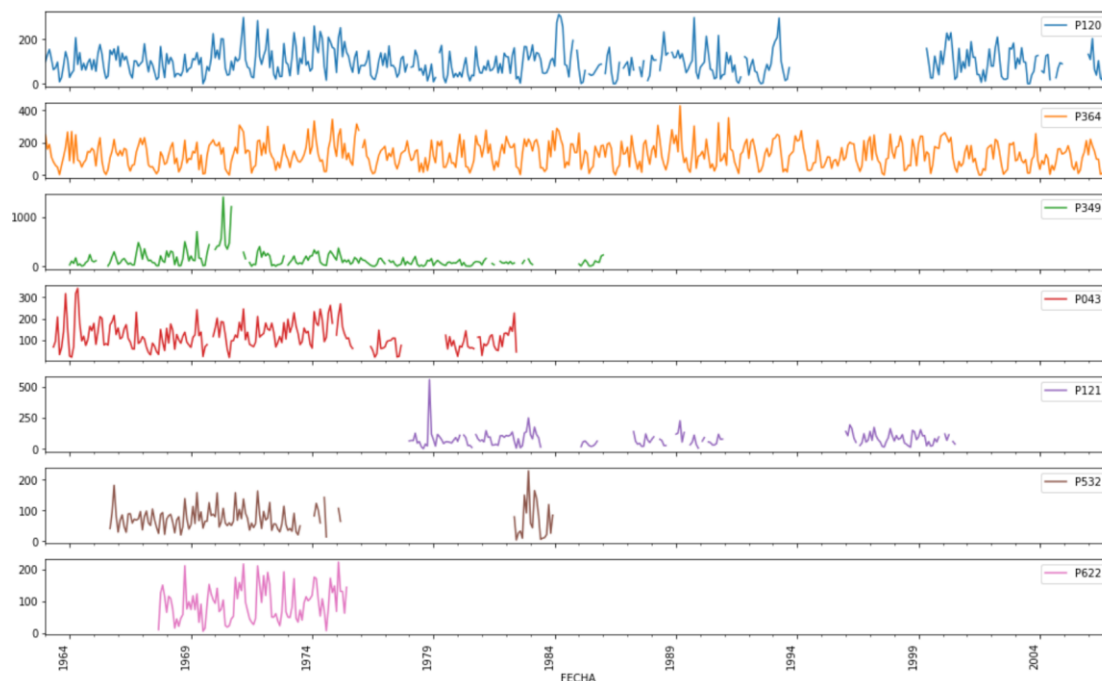
Paso 2.2. Una vez visible la serie de datos del grupo de estaciones se debe elegir un periodo común en el que se aplique el relleno de datos, considerando que al menos una estación debe tener completa la serie de datos para el periodo común seleccionado.

***Ejemplo:** La estación de referencia para definir el periodo de relleno de datos (1963 -2006) de la variable precipitación es la P364 por ser la que presenta mayor continuidad en el registro de datos mensuales.*

Tabla 7. Porcentaje de vacíos que presentan las series de datos del grupo de estaciones seleccionado para la caracterización climática de la cuenca del río Pita.

	Porcentaje Vacios	Total de datos	Numero vacios
P120	17.61	528	93
P364	0.19	528	1
P349	57.77	528	305
P043	62.50	528	330
P121	69.70	528	368
P532	76.70	528	405
P622	82.20	528	434

Fuente: Plataforma Jupyter Notebook, 2019. Elaboración: Vera, A. 2019

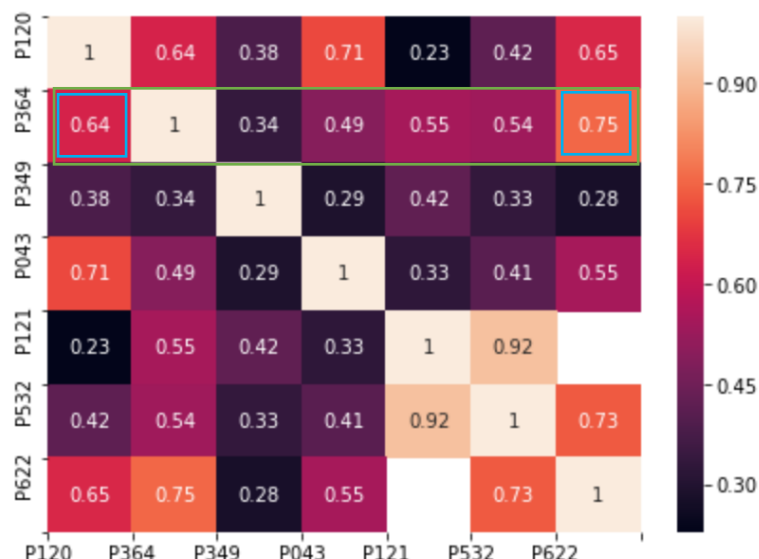


Fuente: Plataforma Jupyter Notebook, 2019. Elaboración: Vera, A. 2019

Figura 4. Periodo de datos de las siete estaciones al que se aplicara la predicción y el relleno de datos para la caracterización de la variable precipitación.

Paso 2.3. Definido el periodo al que se aplicará la predicción y el relleno de datos, se procede con la correlación entre estaciones. Depende del grado de correlación con la estación de referencia, la selección de las estaciones y el periodo de datos para el aprendizaje de la red neuronal.

Ejemplo: La librería Seaborn aplica el coeficiente de correlación de Pearson para medir el grado de relación que existe entre los datos de precipitación de las siete estaciones seleccionadas, para el análisis de precipitación de la cuenca del río Pita (mejor mientras más se acerca a 1). La estación de referencia P364 tiene alta correlación con las estaciones P622 y la P120, sin embargo, como muestra la figura 5, las series de tiempo más completas de las estaciones se concentran en un periodo común de datos que va desde 1967 a 1975, sobre todo entre las estaciones P364, P120 y P043. Por tanto, este periodo es el que se aplicara para el proceso de aprendizaje de la red neuronal y para el relleno de la estación P120 y del resto de estaciones. El código demanda de tres estaciones que tengan un periodo común de datos para el proceso de aprendizaje.

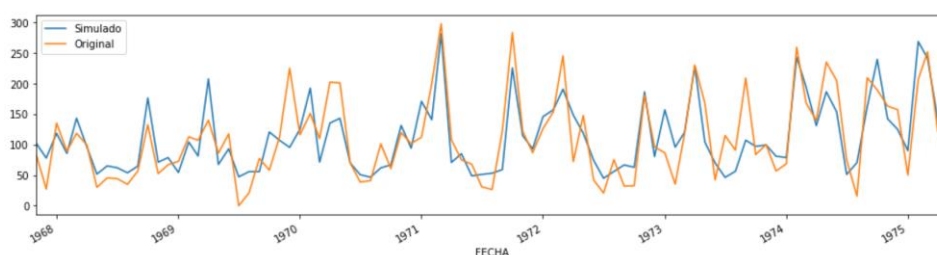


Fuente: Plataforma Jupyter Notebook, 2019. Elaboración: Vera, A. 2019

Figura 5. Grado de correlación inicial entre los datos del grupo de estaciones seleccionadas para el análisis de precipitación de la cuenca del río Pita. Este tipo de correlación será visible para cualquier grupo de estaciones que se contengan el archivo de inicio.

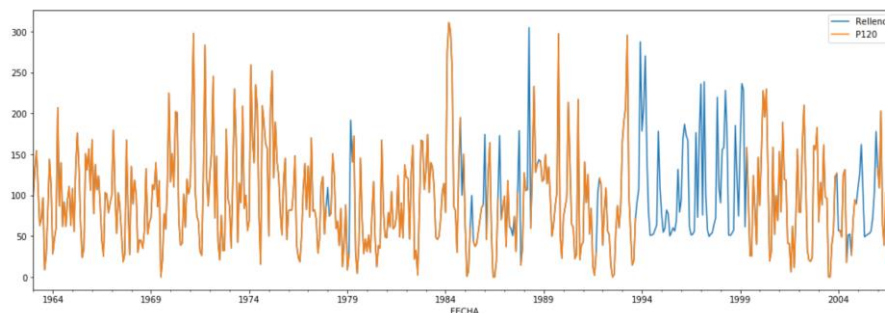
Paso 2.4. El aprendizaje de la red neuronal se ejecuta a través de la librería Keras, este inicia con una serie de comparaciones entre los datos completos del periodo de aprendizaje de las estaciones que mejor se correlacionan para proyectar la información histórica hacia el periodo que se desea rellenar.

Ejemplo: El proceso de aprendizaje sobre el comportamiento de la variable precipitación en la red neuronal se aplicó al periodo de datos completo 1967 – 1975 entre las estaciones P364 y P120 para iniciar el relleno con la estación P120. El desempeño del aprendizaje se mide por el error cuadrático medio de la raíz cuadrada entre la serie simulada y la real.



Fuente: Plataforma Jupyter Notebook, 2019. Elaboración: Vera, A. 2019

Figura 6. Resultado del proceso de aprendizaje y proyección de la estación P120. Coeficiente de correlación entre la Estación P120 original y la estación P120 entrenada después de aplicar el proceso de aprendizaje = 0,80, aceptable para proceder con el relleno de datos de las lagunas existentes en el periodo 1963 -2006.



Fuente: Plataforma Jupyter Notebook, 2019. Elaboración: Vera, A. 2019

Figura 7. Proceso de relleno de datos de la variable precipitación. Estación M120. Método RNA.

Paso 2.5. El mismo procedimiento se aplica al resto de estaciones con la finalidad de conseguir que el grupo cuente con una serie completa de datos en un periodo común considerando siempre el grado de correlación y el error cuadrático medio para el relleno de datos.

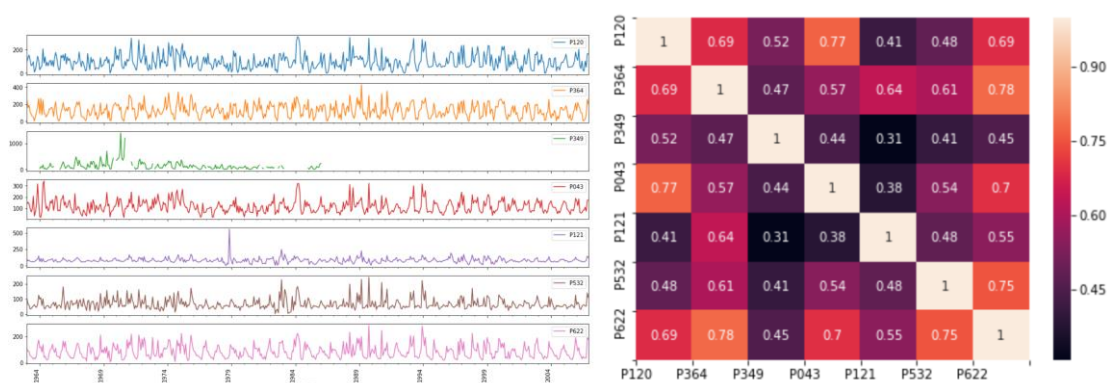


Figura 8. Fase completa de relleno de datos de la variable precipitación para la caracterización climática de la cuenca del río Pita.

La finalidad del relleno de datos es contar con una serie completa de información en un periodo suficiente para la caracterización climática del área agrícola de interés y la cuenca de aporte. Para el ejemplo, el periodo de datos útiles para cualquier análisis climático es el comprendido entre los años 1963 – 2006.

El relleno de datos es el escalón para la homogeneización, proceso que garantiza que las series de tiempo mensuales representen el comportamiento climático en la zona de interés, como lo propone el método del **vector regional**, que relaciona la posición y elevación con la variable climática en cualquier parte de la cuenca, tomando como referencia los datos observados. El vector regional proporciona una serie de funciones que permite calcular una serie mensual interanual de una estación ficticia en cualquier sitio de la cuenca de interés con base en la correlación de un grupo de estaciones que representan el comportamiento climático del área de interés.

El proceso de homogeneización en el entorno de la plataforma Jupyter Notebook, de forma general, se debe desarrollar de la siguiente manera:

1. Abrir el código de procesamiento y ejecutar las rutinas paso a paso, para el grupo de estaciones climáticas al que se aplicó el relleno de datos. El código adaptable a cualquier grupo de estaciones es el archivo **VectorRegional.ipynb** disponible en el siguiente enlace: <https://github.com/paul19pv/RellenoDatosKeras>



Procedimiento para la homogeneización de datos:

El proceso de vector regional se aplica a través de la librería `linear_model` de la plataforma Jupyter Notebook, este tiene por finalidad relacionar los promedios mensuales interanuales de cada estación con la información de latitud, longitud y altitud de las estaciones del grupo seleccionado para la caracterización climática, con la intención de generar los coeficientes que permiten simular los valores mensuales interanuales de estaciones ficticias en cualquier lugar de cuenca de interés. De tal forma que se cuente con la siguiente ecuación para cada mes.

$$\text{Precipitación} = \text{Factor1} \times \text{Longitud} + \text{Factor2} \times \text{Latitud} + \text{Factor 3} \times \text{Altitud} + \text{Coeficiente} \quad \text{Ec. (1)}$$

Los archivos, el código y los coeficientes generados para el ejemplo se encuentran en el siguiente enlace: <https://github.com/paul19pv/RellenoDatosKeras>. La información albergada en el enlace mencionado es adaptable a cualquier base de datos de interés.

***Ejemplo:** Los coeficientes generados para la creación de estaciones ficticias en cualquier lugar dentro del área que cubren las siete estaciones seleccionadas para la caracterización climática de la cuenca del río Pita se presentan en la tabla 8.*

Tabla 8. Coeficiente para la creación de vectores regionales mensuales interanuales en cualquier lugar geográfico de cuenca del río Pita.

Mes	Factor1	Factor2	Factor3	Coeficiente	Precipitación Calculada (mm)
1	438.28	-357.64	-0.02	34394.29	141.48
2	323.99	-312.24	-0.04	25528.59	141.79
3	268.55	-281.48	-0.05	21233.81	157.45
4	113.23	-185.51	-0.06	9114.75	142.35
5	97.02	-266.78	-0.05	7745.54	119.51
6	85.23	-177.93	-0.02	6740.51	78.24
7	114.34	-152.48	-0.01	8968.18	63.26
8	151.05	-153.99	0.00	11824.33	58.75
9	59.01	-58.34	-0.02	4742.63	80.69
10	234.68	-163.89	-0.03	18536.42	129.33
11	347.63	-198.88	0.00	27297.14	131.90
12	344.09	-234.90	-0.01	27035.72	134.97

Fuente y Elaboración: Vera, A. 2019

Ejemplo de cálculo: Precipitación interanual enero (mm/año) = $438,28 \times \text{Longitud}^\circ + (-357,64) \times \text{Latitud}^\circ + (-0.02) \times \text{Altitud (msnm)} + 34394.29$

Precipitación interanual enero (mm/año) = $438,28 \times (-78.49) + (-357,64) \times (-0.64) + (-0.02) \times (3670) + 34394.29$.

Precipitación interanual enero (mm/año) = 141.48mm



El ejemplo para la variable precipitación aplica para el resto de las variables climáticas. El código adaptable (archivo: VectorRegional.ipynb) disponible en el enlace: <https://github.com/paul19pv/RellenoDatosKeras>, permite modificar la ruta de los archivos, código de estaciones meteorológicas y los periodos de aprendizaje y relleno de datos. Es importante mencionar que ninguna plataforma para tratamiento de datos climáticos en automática y mecánica, su utilidad radica en el sentido común del técnico que aplica el tratamiento de datos y su percepción climática del sitio de interés.

Este ejemplo no fue aplicado al sistema agrícola de Santa Lucía -que se retomara más adelante- por no contar con un grupo de estaciones cercanas al área de interés con un registro histórico mayor a 10 años. Se retoma el ejemplo de la cuenca de aporte al área agrícola de interés del cantón Santa Lucía para el resto de la guía asumiendo que los datos con los que cuenta la estación climática más cercana (M1207) son datos mensuales interanuales representativos y con la finalidad de comparar los resultados obtenidos con la información secundaria utilizada en la guía de prefactibilidad.

Tema 3. Preparación de datos climáticos para el uso de plataformas informáticas que facilitan el cálculo del balance hídrico

La preparación de información climática depende del método de cálculo que se utilice para el balance hídrico. En el ámbito agrícola una aplicación recomendada por la FAO es la aplicación CROPWAT², un programa informático para el cálculo de los requerimientos de agua de los cultivos y los requisitos de riego en función de los datos de suelo, clima y los cultivos representativos del área de interés. Además, el programa permite el desarrollo de cronogramas de riego para diferentes condiciones de manejo y el cálculo del esquema de suministro de agua para diferentes patrones de cultivo.

Month	Temp Min °C	Temp Max °C	Humidity %	Wind m/s	Sun horas	Rad MJ/m²/día	ETo mm/día
January	1.2	10.5	85	3.8	12.0	27.3	3.13
February	1.4	10.6	85	3.3	12.0	28.1	3.32
March	1.3	10.6	85	3.3	12.0	28.4	3.35
April	1.2	11.0	84	3.3	12.0	27.5	3.29
May	2.0	10.6	84	4.0	12.0	26.0	2.98
June	2.2	12.0	84	5.0	12.0	25.0	2.91
July	3.0	12.5	86	6.3	12.0	25.4	2.85
August	3.2	12.6	85	5.4	12.0	26.7	3.15
September	2.2	12.1	84	4.1	12.0	27.9	3.40
October	1.9	11.2	83	3.0	12.0	28.0	3.48
November	1.4	11.0	83	2.7	12.0	27.3	3.39
December	1.2	10.5	82	3.6	12.0	26.9	3.18
Average	1.9	11.3	84	4.0	12.0	27.0	3.20

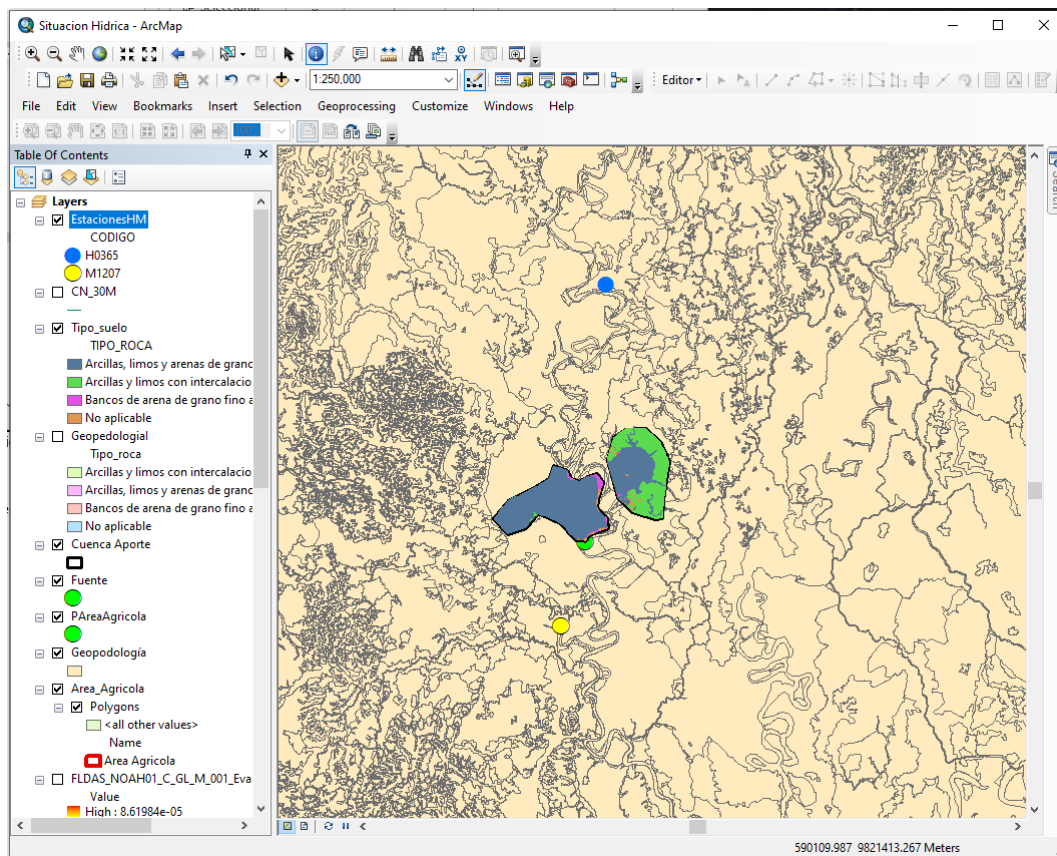
Fuente: Cropwat 2019. Elaboración: Vera, A. 2019

Figura 9. Presentación de información climática de la estación M532 en formato CROPWAT para el cálculo de la variable evapotranspiración.

² <http://www.fao.org/land-water/databases-and-software/cropwat/es/>

La Figura 9 muestra las variables climáticas (columnas blancas) que son requeridas por el programa CROPWAT para el cálculo de la evapotranspiración (cálculo automático) de referencia bajo el método de Penman Monteith. El tipo de información que debe ser introducida en el programa son los valores mensuales promedios interanuales: **temperatura máxima, temperatura mínima, humedad relativa del aire, recorrido del viento y horas de sol.**

***Ejemplo:** En etapa de prefactibilidad, se recreó un área agrícola en la región costa del Ecuador, provincia de Guayas, cantón Santa Lucía.*



Fuente y Elaboración: Vera, A. 2019

Figura 10. Mapa de situación hídrica de las cuencas de aporte ejemplo, etapa prefactibilidad.

El mapa de situación hídrica indicó que existen como elementos hidroclimáticos, una estación meteorológica y una estación hidrológica en el área de influencia de la cuenca de aporte. Para el análisis de comportamiento climático y la obtención de las componentes de ingresos y egresos de agua estos elementos son insuficientes ya que en la realidad cuentan con un año de información histórica. Para el uso localizado de la información se requiere al menos 10 años de registros continuos y al menos una estación cercana con información completa para relleno de información. Sin embargo, para retomar el ejemplo del cálculo de disponibilidad de agua de la cuenca de aporte del área agrícola de interés de la Asociación de regantes el Mate, en el cantón Santa Lucía, se utilizarán los datos de la estación meteorológica M1207, del año 2018, para comparar los resultados obtenidos en la guía de prefactibilidad con información secundaria.

ETo Penman-Monteith Mensual - untitled

País: Ecuador Estación: M1207

Altitud: 7 m. Latitud: 1.53 °S Longitud: 80.10 °W

Month	Temp Min °C	Temp Max °C	Humidity %	Wind m/s	Sun horas	Rad MJ/m²/día	ETo mm/mes
January	22.2	33.1	95	1.3	12.0	27.5	167.08
February	22.3	32.8	96	1.4	12.0	28.2	155.14
March	21.2	32.6	53	1.3	12.0	28.4	188.41
April	19.5	33.7	69	1.3	12.0	27.4	171.15
May	20.7	32.8	73	1.4	12.0	25.8	165.17
June	18.1	31.4	84	1.6	12.0	24.8	141.42
July	17.7	32.2	79	1.6	12.0	25.2	153.26
August	17.1	31.6	71	1.8	12.0	26.6	165.92
September	17.8	32.7	85	1.8	12.0	27.8	163.61
October	18.2	32.2	86	2.0	12.0	28.1	168.70
November	18.4	33.6	84	2.0	12.0	27.5	167.07
December	18.5	33.8	86	1.6	12.0	27.1	167.40
Average	19.3	32.7	80	1.6	12.0	27.0	1974.32

Fuente: Cropwat 2019. Elaboración: Vera, A. 2019

Figura 11. Promedio mensual de las variables climáticas y cálculo de evapotranspiración de los registros de la estación M1207, ubicada en el área de influencia a la cuenca de aporte del área agrícola, cantón Santa Lucía, provincia de Guayas del Ecuador, año 2018. Formato CROPWAT.

Precipitación mensual - untitled

Estación: M1207 Método Prec. Ef: Método USDA S.C.

	Precipit. mm	Prec. efec mm
Enero	130.5	103.3
Febrero	357.9	160.8
Marzo	154.7	116.4
Abril	17.1	16.6
Mayo	29.2	27.8
Junio	5.0	5.0
Julio	7.8	7.7
Agosto	7.2	7.1
Septiembre	9.0	8.9
Octubre	6.0	5.9
Noviembre	38.7	36.3
Diciembre	134.1	105.3
Total	897.2	601.1

Fuente: Cropwat 2019. Elaboración: Vera, A. 2019

Figura 12. Precipitación mensual acumulada y cálculo de precipitación efectiva de los registros de la estación M1207, ubicada en el área de influencia a la cuenca de aporte del área agrícola, cantón Santa Lucía, provincia de Guayas del Ecuador, año 2018. Formato CROPWAT.

Ejemplo: Comparación y rangos de ajuste de los datos satelitales con los datos registrados por la estación M1207.



Tabla 9. Comparación y rangos de ajuste de los datos satelitales con los datos registrados por la estación M1207. Fuente y Elaboración: Vera, A. 2019

Variables	Datos Observados M1207 (anual)	Datos Satelitales (anual)	Sobre Estimación	Sub Estimación
Precipitación	897.2 mm	808.3 mm		10%
Evapotranspiración	1974.32 mm	642.8 mm	67%	

La Tabla 9, indica que los valores de precipitación satelital anual subestiman a la precipitación observada en territorio en un 10%, en el año 2018. La estación M1207, cuenta con apenas un año (2018) de información climática, mientras que la información satelital del proyecto GPM_3IMERGM v06 cuenta con datos de precipitación y evapotranspiración desde el año 2000. Para hacer uso de la información satelital con una corrección local se puede aplicar un factor de ajuste de +10% a cada año. En el caso de la evapotranspiración es lo contrario, la información satelital subestima a la evapotranspiración medida en territorio en un porcentaje muy elevado (67%), que constituye un riesgo para la cuantificación del balance hídrico. En este caso es mejor contar con mayor cantidad de datos anuales en la estación de referencia (M1207) para aplicar un factor de ajuste coherente a los datos satelitales que permiten alargar las series de datos para el cálculo del balance hídrico.

El análisis comparativo entre la precipitación satelital y la precipitación en territorio es útil cuando la estación en territorio no cuenta con un registro histórico suficiente (al menos diez años), sin embargo, es representativa del área de interés. Entender que mientras más se aproximen los datos satelitales a los datos en territorio, utilizando al menos un año de información para la comparación, es definitivo para tomar la decisión de utilizar la base de datos satelitales para la estimación de la disponibilidad de agua en el área agrícola de interés. **La ventaja de utilizar información satelital de alta aproximación es descartar el relleno y la homogenización de datos de un grupo de estaciones instaladas en territorio.**

Precipitación efectiva (P_{efec})

La plataforma CROPWAT utiliza la información de precipitación promedio mensual, para el cálculo de la precipitación efectiva, a través de cuatro metodologías diferentes:

- Porcentaje fijo de precipitación,
- Precipitación fiable,
- Formula empírica y,
- Método del USDA Soil Conservation Service.

La descripción de las metodologías mencionadas se las puede consultar en el siguiente enlace: <https://es.slideshare.net/wilwi/cropwat-teora>

En Resumen

En principio se abordó el tema de las fuentes de información para la obtención de datos. Así, para cada uno de los componentes del balance hídrico (ingresos, egresos, consumos y reingresos), las cuales se puede acudir para la obtención de datos como precipitación, caudales, evapotranspiración, suelos, calidad de agua.



En este primer capítulo se trató el tema del análisis de la información climática para un diagnóstico integral de un sistema de riego y su área de influencia. Inicialmente, se trató el tema del procesamiento de información climática. Aquí, se realiza una propuesta de una herramienta informática para el procesamiento de la información, que presenta una gran precisión en el relleno y homogeneización de datos, conocida como Jupyter Notebook, que utilizan el concepto de “redes neuronales artificiales (RNA)” para tratar la información climática.

Las redes neuronales artificiales (RNA) aplicadas a la meteorología se utilizan para completar las series cronológicas de datos, a través del entrenamiento con series de datos completas de estaciones altamente correlacionadas.

La metodología para el diseño de la RNA a una serie de datos climáticos tiene dos pasos: i) constitución de un grupo de estaciones y ii) relleno y homogeneización de datos. El primer paso, consiste en la recolección de información de diferentes estaciones identificadas en el área de influencia (metodología vista en la guía de prefactibilidad).

El segundo paso, consiste en la aplicación y entrenamiento de la RNA, usando el conjunto de datos históricos de estaciones vecinas con periodo completos de datos. Para completar los datos faltantes de una estación en particular la RNA minimiza el **error cuadrático medio** entre el valor de salida y el valor real esperado. Para ello se utiliza la plataforma Jupyter Notebook que contiene varias **librerías** de alto nivel, escritas en Python para aplicar el concepto de redes neurales. Las librerías utilizadas para el tratamiento de datos son: Pandas (rutina para leer archivos), Seaborn (rutina para realizar correlaciones) y Keras (redes neuronales para relleno de datos).

El relleno de datos a través de RNA, contiene varios subpasos: i) tratamiento de datos iniciales, ii) determinación de un período en común de datos de las estaciones para el entrenamiento, iii) aplicar la predicción y relleno de datos, iv) ejecución de la librería Keras para relleno de datos, v) aplicación de la misma metodología para las otras estaciones.

La homogeneización de datos a través de la plataforma Jupyter Notebook, tiene por finalidad relacionar los promedios mensuales interanuales de cada estación con la información de latitud, longitud y altitud de las estaciones del grupo seleccionado para la caracterización climática, con la intención de generar los coeficientes que permiten simular los valores mensuales interanuales de estaciones ficticias en cualquier lugar de cuenca de interés.

Finalmente, se trató el punto de preparación de los datos climáticos obtenidos para el uso de plataformas informáticas que calculan el balance hídrico. En el ámbito agrícola una aplicación recomendada por la FAO es la aplicación CROPWAT, un programa informático para el cálculo de los requerimientos de agua de los cultivos y los requisitos de riego en función de los datos de suelo, clima y los cultivos representativos del área de interés.

El programa CROPWAT utiliza para el cálculo de la evapotranspiración de referencia el método de Penman Monteith. El tipo de información que utiliza son valores mensuales promedios interanuales: temperatura máxima, temperatura mínima, humedad relativa del aire, recorrido del viento y horas de sol.



CAPÍTULO 2. ¿CÓMO SE REALIZA UNA CARACTERIZACIÓN HIDROFÍSICA DEL SUELO?

Caso Junta de Riego El Mate

En la etapa de campo, la asesora en riego integral parcelario conjuntamente con la organización planificó un recorrido para realizar un diagnóstico del suelo dentro del área de interés o influencia del sistema de riego.

El fin de este diagnóstico del suelo, fue conocer las características físicas y químicas del suelo relacionadas con el riego, como: textura, estructura, capacidad de campo, punto de marchitez permanente, profundidad efectiva, infiltración del agua en el suelo, entre las principales.

Ya en campo, la asesora realizó una descripción de perfiles de suelo en zonas representativas para analizar las características antes mencionadas. Posteriormente analizó la información y determinó zonas con suelos homogéneos.

Esta información le permitió conocer las características que influyen en el movimiento del agua en el suelo y determinar algunos parámetros de riego necesarios para un proceso de mejoramiento y tecnificación a nivel parcelario.

En un diagnóstico integral de un sistema de riego y su área de influencia, la caracterización y análisis de las características físicas y químicas del suelo es muy importante, ya que nos permitirá conocer la relación entre el suelo y el movimiento del agua, parámetro básico de comprender, para cualquier proceso de mejoramiento y tecnificación del riego a nivel parcelario.

El suelo tiene características físicas y químicas que tienen un efecto directo en el movimiento del agua, como: la textura, la estructura, la profundidad, pedregosidad, pendientes, contenido de materia orgánica. Dependiendo de estas características, un suelo puede tener diferentes contenidos de agua, capacidad de almacenamiento y capacidad de infiltración, parámetros esenciales para el diseño de un sistema de riego por goteo o aspersión.

Tema 1. ¿Cuál es la metodología para determinar características hidrofísicas del suelo que intervienen en el balance hídrico?

Metodología para descripción de perfiles y muestreo de suelo

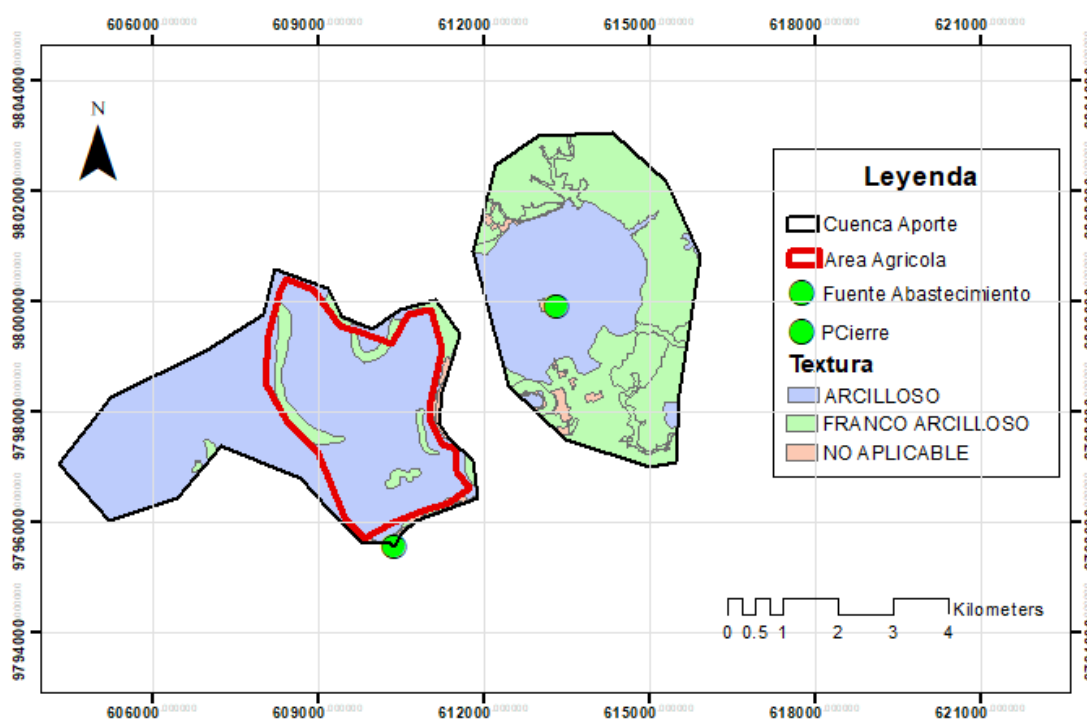
La descripción morfológica es un procedimiento básico para conocer las características físicas, químicas y biológicas del suelo, con el fin de planificar efectivamente su uso y manejo con fines agroproductivos. La descripción morfológica de los suelos se la puede aplicar con la referencia de la FAO (1966) que presenta la guía para la descripción de suelos en la que se consideran criterios aceptados para estudios de reconocimiento o cartografía de suelos (<http://www.fao.org/3/a0541s/a0541s.pdf>).

Esta metodología consiste en determinar algunas características físicas como: textura, estructura, color, profundidad, pedregosidad, porosidad, presencia de raíces, presencia de microorganismos, presencia de carbonatos, entre otros.

Para llevar a cabo la descripción morfológica de los perfiles de suelos, así como su caracterización analítica, es necesaria la excavación de calicatas de aproximadamente 1 por 1,5 metros, y 2 metros de profundidad. De esta forma se facilita la descripción de campo y el muestreo de cada uno de los horizontes identificados.

Procedimiento para la descripción morfológica:

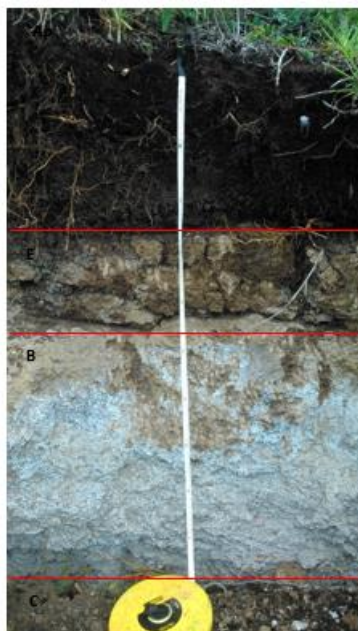
- Inicialmente se debe realizar una zonificación del área del sistema de riego, a fin de obtener diferentes tipos de suelos con características homogéneas, considerando variables como: textura, color, profundidad del suelo, pendiente, topografía. Para esto se puede realizar recorridos por la zona del sistema de riego tomando puntos GPS que permitan identificar diferentes zonas. También se puede utilizar el mapa geopedológico del suelo, donde se puede analizar y clasificar el suelo por diferentes variables físicas.



Fuente: <http://geoportal.sigtierras.gob.ec:8080/GeoserverViewer/>

Figura 13. Texturas de suelo en el área agrícola de interés del cantón Santa Lucía, provincia Guayas Ecuador.

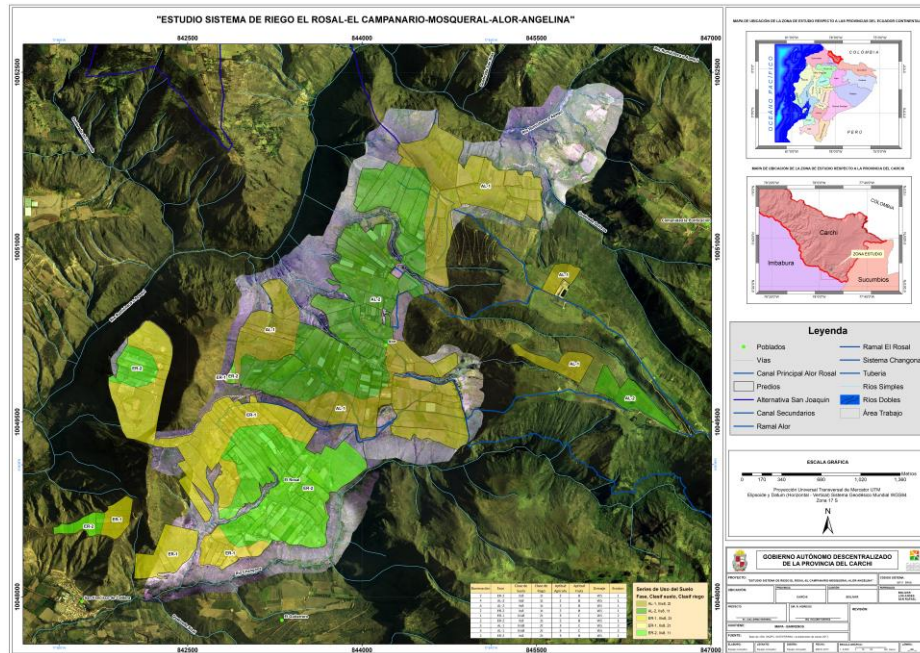
- En cada zona identificada se debe realizar la descripción morfológica de ese suelo. El número de observaciones a realizar depende de la escala del mapa a realizar. Así para un diagnóstico de factibilidad, en el área de un sistema de riego se debería utilizar una escala entre 1:10000 a 1:25000, para lo cual el número de observaciones debe estar entre 15 a 85 por cada 100 hectáreas.
- Cada observación consiste en una descripción de un perfil de suelo. Se debe hacer una calicata o encontrar un perfil de suelo, en un corte de camino o carretera.



Fuente: Larrea, D. 2017

Figura 14. Perfil de suelo – método calicata.

- Para evitar hacer calicatas se pueda utilizar el método del barreno, el cual permite describir características como textura, color, profundidad, pedregosidad, presencia de carbonatos. En el caso de aplicar este método, de las 15 observaciones a realizar, mínimo debe hacerse 5 calicatas y el resto pueden ser barrenaciones.
- En cada descripción del perfil de suelo (calicata), se deberá analizar por horizonte variables como: textura, profundidad del horizonte, color del horizonte, estructura, porosidad, presencia de raíces, reacción al ácido, procesos de oxidación-reducción, presencia de agua, entre los principales.
- Adicionalmente de cada horizonte se deben tomar muestras no disturbadas para análisis de CC, PMP, DA, HA. Para ello, la muestra de suelo sin alterar se toma cilindros de 6 por 8 centímetros de diámetro. Adicionalmente, de cada horizonte se toma una muestra de suelo con un peso de 1 kg para análisis de textura y pH.
- Finalmente, de cada tipo de suelo identificado se debe tomar una muestra con un peso de 1 kg para análisis de las propiedades químicas del suelo. Cada muestra debe ser representativa de la zona, por tal motivo debe estar compuesta de al menos 15 submuestras. Las propiedades que se deben evaluar a través de un examen de laboratorio son: pH, macronutrientes, micronutrientes, CE, RAS, aluminio y hierro.
- Esta información puede ser georreferenciada y crear un mapa agrológico a detalle, que determine las características y superficie por cada tipo de suelo del sistema agrícola de interés.



Fuente: Larrea, D. 2017

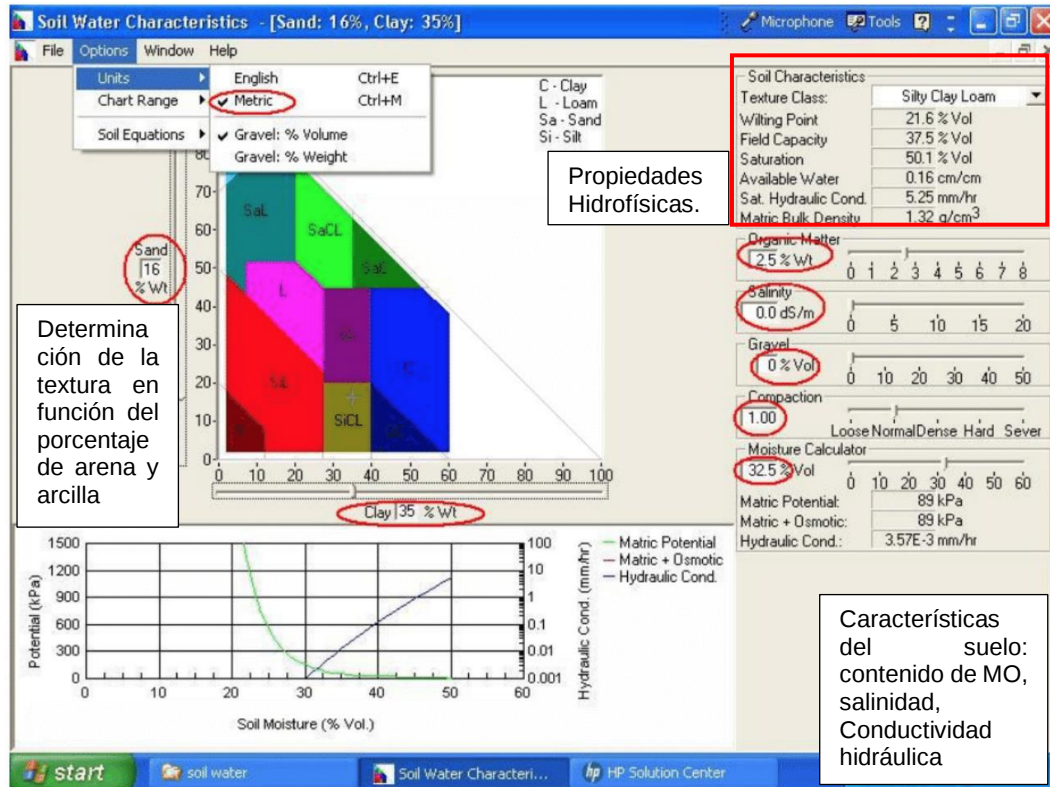
Figura 15. Ejemplo de mapa agroológico creado con la información georreferenciada levantada en campo.

Metodología para determinar la velocidad de infiltración a través del uso de programas informáticos

Programa Soil Water Characteristics (SWC)

Frecuentemente, el análisis hidrológico involucra la evaluación de la infiltración del suelo, el almacenaje y la relación agua-suelo- cultivo. Para poder definir el efecto del agua del suelo es necesario estimar la curva de retención hídrica y la conductividad hidráulica. Las mediciones de campo y laboratorio son dificultosas, costosas y a menudo impracticables para muchos análisis hidrológicos. Por lo tanto, las correlaciones estadísticas entre la textura del suelo, la curva de retención hídrica y la conductividad hidráulica pueden proveer estimaciones suficientemente correctas para muchos análisis y toma de decisiones (Vazquez, 2015).

En este contexto, a la hora de trabajar sobre un suelo es bastante común poder contar con valores de textura, pero normalmente no es fácil contar con curvas de retención de humedad, ni con mediciones de infiltración y conductividad hidráulica. Para estas situaciones, la aplicación "Soil Water Characteristics (SWC)" resulta una herramienta útil ya que estima el almacenaje, la curva de retención hídrica y la transmisión de agua del horizonte de un perfil de suelo agrícola mediante funciones de pedotransferencia, utilizando valores conocidos de textura, materia orgánica, salinidad y grado de compactación, que pueden ser obtenidos de la descripción morfológica del suelo y análisis de laboratorio.



Fuente: SWC, 2019. Elaboración: Vera, A. 2019

Figura 16. Interfase gráfica de la aplicación Soil Water Characteristics (SWC).

La aplicación SWC permite estudiar cómo varían los parámetros físicos en función de las texturas de suelo. Esto puede hacerse arrastrando el Mouse dentro del triángulo textural y manteniendo el botón izquierdo apretado para observar cómo varían sobre el cuadro superior derecho el Punto de Marchitez (Wilting Point), Capacidad de campo (Field Capacity), Agua útil (Available water) etc, como así también viendo las curvas de potencial mátrico³, mátrico más osmótico y conductividad hidráulica, ubicadas en el sector inferior de la pantalla. La siguiente tabla ejemplifica los valores de salida calculados por la aplicación SWC, para algunos valores de % de arena y % de arcilla que representan a las 12 clases texturales del triángulo.

Tabla 10. Estimación de niveles de retención para distintas clases texturales a un contenido constante de 2,5% de MO, sin salinidad, sin gravas ni ajustes por densidad aparente - SWC

Clase Textural	Arena	Arcilla	PMP	CC	Saturación	Agua Útil	K sat	Densidad Aparente
			1500 kPa	33 kPa	0 kPa		mm/hora	g/cm3
	%w				%v			
Arenoso (Sa)	88	5	5	10	46	5	108.1	1.43
Areno-Franco (Lsa)	80	5	5	12	46	7	96.7	1.43
Franco-Arenoso (SaL)	65	10	8	18	45	10	50.3	1.46
Franco (L)	40	20	14	28	46	14	15.5	1.43
Franco-Limoso (SiL)	20	15	11	31	48	20	16.1	1.38
Limoso (Si)	10	5	6	30	48	25	22	1.38
Franco-Arcillo-Arenoso (SaCL)	60	25	17	27	43	10	11.3	1.50
Franco-Arcilloso (CL)	30	35	22	36	48	14	4.3	1.39
Franco-Arcillo-Limoso (SiCL)	10	35	22	38	51	17	5.7	1.30
Arcillo-Limoso (SiC)	10	45	27	41	52	14	3.7	1.26
Arcillo-Arenoso (SaC)	50	40	25	36	44	11	1.4	1.47
Arcilloso	25	50	30	42	50	12	1.1	1.33

PMP: Punto de Marchitez permanente; CC: Cap de campo; Ksat: Conductividad hidráulica en saturación.

Fuente: Soil Water Characteristics, 2019

³ Potencial Mátrico. El Potencial Mátrico es el necesario para extraer el agua adherida a las partículas sólidas en la matriz del suelo

Para profundizar el uso de la aplicación SWC, se encuentra disponible en el siguiente enlace [https://www.researchgate.net/publication/282119926 Introduccion y Tutorial en espanol al programa Soil Water Characteristics Hydraulic Properties Calculator Saxton y Rawls para estudiantes de la Maestria de Cuencas Hidrograficas de la Univ Nac de La P](https://www.researchgate.net/publication/282119926_Introduccion_y_Tutorial_en_espanol_al_programa_Soil_Water_Characteristics_Hydraulic_Properties_Calculator_Saxton_y_Rawls_para_estudiantes_de_la_Maestria_de_Cuencas_Hidrograficas_de_la_Univ_Nac_de_La_P), el tutorial de descarga y uso.

Método de determinación de la velocidad de infiltración en campo

Si se cuenta con el equipo de campo (anillos infiltrómetros) para medir la velocidad de infiltración en campo, se lo hace a través del método del **infiltrómetro de doble anillo**.

Es el método de campo más generalizado, que permite medir la disminución de la altura de agua almacenada en un recipiente cilíndrico, clavado en la superficie del suelo, durante intervalos de tiempo. El infiltrómetro de anillos concéntricos estandarizado por el USDA⁴ tiene las siguientes dimensiones y componentes: aro interior, 22 a 30 cm de diámetro y 30 cm de longitud, que se entierra 10 a 15 cm; el aro exterior de por lo menos 30 cm de diámetro y 18 cm de longitud. Completan el infiltrómetro una regla milimetrada fija y una varilla corrediza con un gancho con cuya punta se toca el nivel del agua, desde abajo.

Un infiltrómetro de doble anillo típico de hierro, PVC, aluminio, etc., se muestra en la Figura 17. Los infiltrómetros pueden ser con recarga de agua constante o variable. Estos últimos proponen efectuar la medición del volumen de agua infiltrado en un tanque, desde donde se alimenta el dispositivo donde ocurre la infiltración, manteniendo la altura de agua constante.



Fuente: http://aulavirtual.agro.unlp.edu.ar/pluginfile.php/15618/mod_resource/content/2/unidad%202%202017.pdf

Figura 17. Infiltrómetro de doble anillo

Para realizar los ensayos, se eligen lugares representativos (uno por cada tipo de suelo), de las condiciones en que se establecerá la infiltración que se quiere caracterizar (una prueba por cada tipo de suelo identificado). Los cilindros se introducen en el suelo cuidando que queden bien centrados entre sí y tratando de disturbar lo menos posible el suelo, sobre todo no compactarlo. El cilindro interior debe quedar enterrado unos 12 cm y el exterior 10 cm.

La cámara que queda formada entre ambos cilindros también se llena con agua hasta una altura conveniente y para que actúe como amortiguador, evitando que el agua que ingresa en el cilindro central se desplace lateralmente (se quiere medir la infiltración en sentido vertical).

⁴ USDA. Departamento de Agricultura de los Estados Unidos



Una vez que se incorpora el agua a los cilindros, no sobrepasando una altura de 15 cm., comienzan a cronometrarse los descensos del nivel de agua que ocurren en el cilindro central debido a la infiltración, en intervalos de tiempo inicialmente pequeños, del orden del minuto, aumentándose hasta alcanzar la Infiltración básica (I_b)⁵ o hasta evaluar el proceso de infiltración durante un lapso definido de acuerdo con los fines para los cuales se realizan las mediciones.

Se aconseja tomar 2 mediciones cada 5 minutos, luego 2 mediciones cada 10 minutos, luego 2 mediciones cada 15 minutos, luego 2 mediciones cada 30 minutos, y finalmente 2 mediciones cada 60 minutos. El tiempo total de la prueba varía en función del tipo de suelo (de 45 a 90 minutos en suelos arenosos y de 3 a 5 horas en suelos arcillosos).

Los valores de las observaciones se van registrando en planillas u hojas de cálculo de programas de computación, confeccionadas a tal efecto y con los conjuntos de pares de valores relativos a las velocidades de infiltración y sus tiempos asociados, se elaborarán las gráficas y se efectúan los ajustes a los modelos matemáticos propuestos (modelo de Kostiakov), para construir la ecuación de la velocidad de infiltración que represente el sitio y las condiciones ensayados.

A partir de los datos de infiltración obtenidos, se construye la ecuación de Kostiakov, mostrada a continuación.

$$D = ct^m \quad \text{Ec. (2)}$$

Donde **D** corresponde a la altura de agua infiltrada, **t** al tiempo de infiltración y **c** y **m** a constantes empíricas.

La velocidad de infiltración corresponde a:

$$VI = mct^{m-1} \quad \text{Ec. (3)}$$

Que llegado un tiempo de estabilización equivale a la conductividad hidráulica saturada.

Ejemplo de cálculo: La siguiente tabla muestra que, los valores de la columna 8 surgen del cociente entre los valores de las columnas 6 y 2, multiplicadas por 60 min/h. Los puntos coordinados que se grafican y ajustan al modelo de Kostiakov-Lewis, son los valores de las columnas 8 y 3. Esta planilla no necesariamente debe ser igual al modelo presentado y cada técnico podrá introducir las variantes que crea convenientes para asegurar una buena medición.

⁵ La Infiltración base (I_b) es la velocidad de infiltración (I) cuando tiende a hacerse constante en el tiempo, se expresa en mm/hora

Tabla 11. Planilla de registros de las observaciones en infiltrómetro de doble anillos

1	2	3	4	5	6	7	8
Hora	Tiempo parcial	Tiempo acumulado	Carga de agua inicial	Carga de agua final	Lámina infiltrada Parcial	Lámina infiltrada Acumulada	Velocidad de infiltración
	(min).	(min)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm/h)
8.01	0		15				
8.06	5	5	15	13.9	1.1	1.1	13.2
8.11	5	10	13.9	13.2	0.7	1.8	8.4
8.21	10	20	13.2	12.5	0.7	2.5	4.2
8.31	10	30	12.5	12.1	0.4	2.9	2.4
8.46	15	45	12.1	11.7	0.4	3.3	1.6
9.01	15	60	11.7	11.4	0.3	3.6	1.2
9.31	30	90	11.4	10.8	0.6	4.2	1.2
			recarga a 15 cm				
10.01	30	120	15	14.5	0.5	4.7	1
11.01	60	180	14.5	13.5	1	5.7	1
12.01	60	240	13.5	12.5	1	6.7	1

Fuente y Elaboración: Vera, A. 2019

Tema 2. Preparación de datos de suelo para el uso de plataformas informáticas que facilitan el cálculo del balance hídrico

Únicamente ciertas variables agronómicas son requeridas para el balance hídrico, estas dependen de la plataforma informática que se utilice para el cálculo.

Ejemplo: Datos agronómicos que utiliza la plataforma CROPWAT para el balance hídrico con énfasis en riego parcelario, figuras 18 y 19.

Fuente: Cropwat 2019. Elaboración: Vera, A. 2019

Figura 18. Datos agronómicos que utiliza Cropwat para balance hídrico

Ejemplo: Información de suelo obtenida de la base de datos CROPWAT con la referencia de textura en el área agrícola de interés del cantón Santa Lucía, provincia Guayas Ecuador.



Suelo - C:\ProgramData\CROPWAT\data\soils\BLACK CLAY SOIL.SOI

Nombre del suelo: BLACK CLAY SOIL

Datos generales de suelo

Humedad de suelo disponible total (CC-PMP)	200.0	mm/metro
Tasa maxima de infiltración de la precipitación	30	mm/día
Profundidad radicular máxima	900	centímetros
Agotamiento inicial de hum. de suelo (como % de ADT)	50	%
Humedad de suelo inicialmente disponible	100.0	mm/metro

Fuente: Cropwat 2019. Elaboración: Vera, A. 2019

Figura 19. Datos generales del suelo en el área agrícola de interés del cantón Santa Lucía, provincia Guayas Ecuador.



En Resumen

El segundo capítulo, abordó el tema de la metodología para la caracterización hidrofísica del suelo, que se basa en la descripción de perfiles y muestreo del suelo, dentro del área de interés o influencia del sistema de riego.

La descripción morfológica es un procedimiento básico para conocer las características físicas, químicas y biológicas del suelo, con el fin de planificar efectivamente su uso y manejo con fines agroproductivos.

Esta metodología consiste en determinar algunas características físicas como: textura, estructura, color, profundidad, pedregosidad, porosidad, presencia de raíces, presencia de microorganismos, presencia de carbonatos, entre otros.

Para llevar a cabo la descripción morfológica de los perfiles de suelos, así como su caracterización analítica, es necesaria la excavación de calicatas de aproximadamente 1 por 1,5 metros, y 2 metros de profundidad. De esta forma se facilita la descripción de campo y el muestreo de cada uno de los horizontes identificados.

Para la determinación de la velocidad de infiltración de un suelo, se la puede realizar a través de dos metodologías: la primera, utilizando una herramienta informática conocida como Soil Water Characteristics. La aplicación resulta una herramienta útil ya que estima el almacenaje, la curva de retención hídrica y la transmisión de agua del horizonte de un perfil de suelo agrícola mediante funciones de pedotransferencia, utilizando valores conocidos de textura, materia orgánica, salinidad y grado de compactación, que pueden ser obtenidos de la descripción morfológica del suelo y análisis de laboratorio.

La segunda metodología, es la determinación de la velocidad de infiltración a través del método del infiltrómetro de doble anillo. Este método permite medir la disminución de la altura de agua almacenada en un recipiente cilíndrico, clavado en la superficie del suelo, durante intervalos de tiempo. El infiltrómetro de anillos concéntricos estandarizado tiene las siguientes dimensiones y componentes: aro interior, 22 a 30 cm de diámetro y 30 cm de longitud, que se entierra 10 a 15 cm; el aro exterior de por lo menos 30 cm de diámetro y 18 cm de longitud. Completan el infiltrómetro una regla milimetrada fija y una varilla corrediza con un gancho con cuya punta se toca el nivel del agua, desde abajo.

Finalmente, se trató el punto de preparación de estos datos de suelo para el uso en plataformas que calculan el balance hídrico. Al igual que en el capítulo anterior, se propone el uso del software CROPWAT, que permite el ingreso de datos como capacidad de campo, infiltración, profundidad del suelo, entre otros.



CAPÍTULO 3. ¿CÓMO DETERMINAR LOS REQUERIMIENTOS HÍDRICOS DE LOS CULTIVOS?

Caso Junta de riego El Mate

Dentro de este proceso de detalle y profundización del diagnóstico integral en el sistema de riego El Mate y su área de influencia, fue importante determinar los consumos de agua por parte de los cultivos.

Así, la asesora en riego integral parcelario, utilizó la guía “Dinámicas de los sistemas de producción bajo riego”, para caracterizar los sistemas de producción en el área de influencia del sistema de riego.

Se llegó a la conclusión que el principal sistema de cultivo de la zona es el arroz, con 2,5 ciclos al año, de los cuales uno es en condiciones de secano y el resto, producido bajo riego.

La asesora con este contexto, analizó los requerimientos hídricos para el cultivo de arroz, para lo cual acudió a fuentes bibliográficas e investigaciones locales para determinar los valores “kc” del cultivo. Encontró que dichos valores son: 1,05 – 1,2 – 0,75, para las diferentes etapas fenológicas del arroz.

Con estos valores y la evapotranspiración de referencia de la zona, determinó las necesidades de agua del cultivo durante todo su ciclo productivo y para cada mes del año.

Tema 1. ¿Qué es la evapotranspiración del cultivo (ETc)?

La evapotranspiración de referencia (ETo) representa la pérdida de humedad que sufre el suelo por evaporación, más la pérdida de agua por transpiración de un cultivo de referencia en condiciones de cobertura ideales. Sin embargo, la pérdida de agua de un cultivo en condiciones reales esta dada por la evapotranspiración del cultivo (ETc), expresada en mm/día, la cual se obtiene al convertir la ETo a ETc utilizando un coeficiente específico para cada cultivo, Kc.

$$ETc = ETo \times Kc \quad Ec. (3)$$

Donde:

ETc= Evapotranspiración del cultivo en mm/día.

ETo= Evapotranspiración de referencia en mm/día.

Kc = Coeficiente de cultivo (a dimensional)

Al calcular la ETc, hay que identificar las etapas de crecimiento del cultivo, su duración, y seleccionar el coeficiente Kc adecuado.

Coeficiente de cultivo (Kc)

Los factores que pueden influir en el coeficiente de cultivo son: las características del cultivo, la fecha de siembra o plantación, el ritmo de desarrollo de cultivo, la duración del período vegetativo, las condiciones climáticas, etc.



FACTORES	TIPO DE CULTIVO								
	A	B	D	E	F	G	H	L	
Cubierta vegetal				✓	✓				
Heladas				✓		✓			
Humedad	✓	✓	✓	✓		✓			
Viento	✓	✓	✓	✓		✓	✓		
Edad				✓	✓		✓		
Frecuencia riegos o lluvias	✓			✓				✓	
Textura del suelo								✓	
Tipos de cultivo									
Leyenda:									
A = Cultivos extensivos y de hortalizas									
B = Arroz									
C = Caña de Azúcar									
D = Alfalfa									
E = Árboles caducifolios y de nuez									
F = Cítricos									
G = Uva									
H = Banana									
I = Hierbas acuáticas									
J = Café									
K = Té									
L = Suelos desnudos									

Figura 20. Factores que influyen en el coeficiente de cultivo Kc.

Fuente: <https://es.slideshare.net/xiscogarau/programa-para-el-ciclo-de-las-necesidades-hdricas-en-cultivos>

La FAO (2006), recomienda estimar el Kc de cada cultivo de acuerdo con su metodología propuesta, estableciendo cuatro etapas básicas y realizando una interpolación entre los valores intermedios:

- **Etapla inicial:** Es un período después de siembra o transplante, en que las plantas crecen lentamente, cubriendo hasta un 10 % de la superficie. Para cultivos anuales, la ETC, en esta etapa, corresponde exclusivamente a la evaporación directa del suelo, por lo que el valor del Kc está determinado por la frecuencia de riego o lluvia.
- **Desarrollo:** desde el 10 % de cobertura y durante el crecimiento activo de la planta, hasta la emisión de la primera flor. El Kc cambia rápidamente, hasta alcanzar el valor máximo. Se estiman los Kc por interpolación entre los Kc de las etapas anterior y posterior.
- **Etapla media:** entre floración y fructificación, correspondiente en la mayoría de los casos al 70- 80 % de cobertura máxima de cada cultivo y Kc.
- **Etapla Final:** Etapa de maduración y decadencia. En esta etapa el Kc vuelve a bajar.

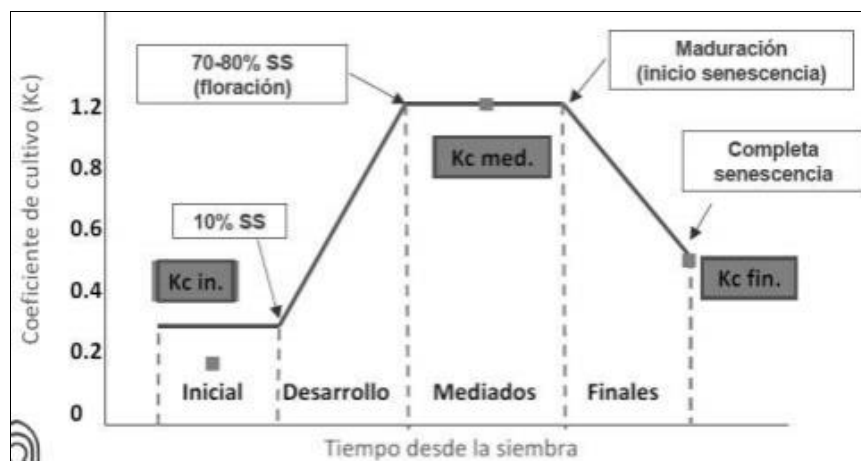


Figura 21. Curva generalizada del coeficiente de cultivo K_c .
Fuente: Alcobendas (2005)

En el caso de no disponer de K_c medidos a nivel local, los valores de K_c para diversos cultivos están disponibles en la base de datos de la plataforma CROPWAT de la FAO.

Ejemplo: Curva de K_c para el cultivo arroz, obtenida de la base de datos FAO. Cultivo característico de la región costa del Ecuador asociado al área agrícola del cantón Santa Lucía, provincia Guayas – Ecuador.

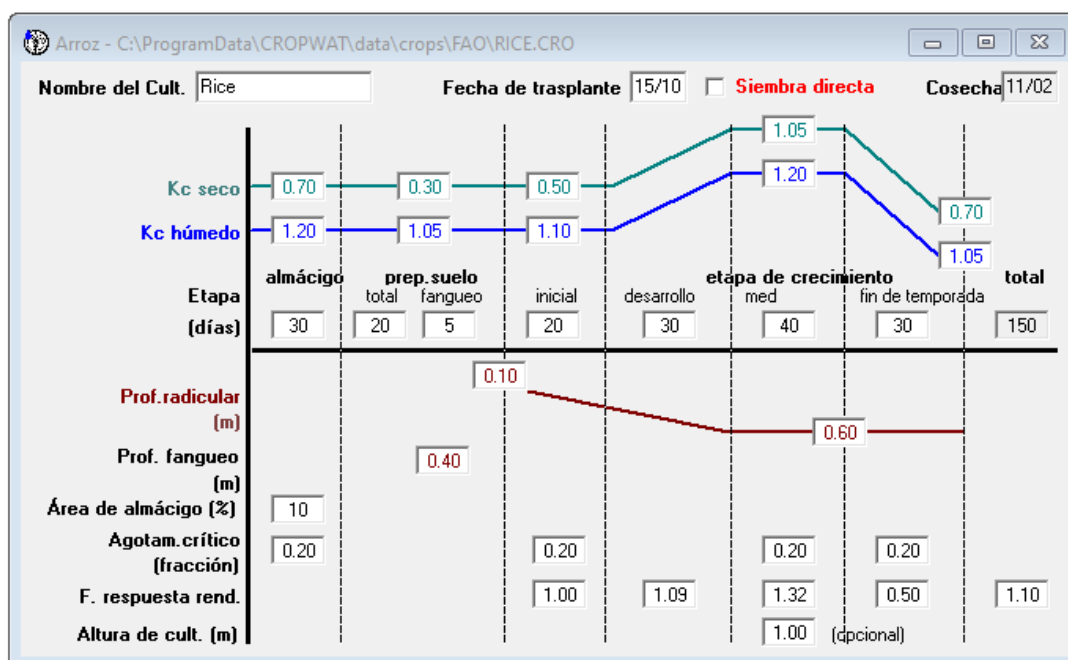


Figura 22. Información K_c que intervienen el cálculo de balance hídrico, requerida por la plataforma CROPWAT

En la siguiente tabla se presentan valores de K_c inicial, medio y final de varios cultivos de ciclo corto y perennes. Así también en la tabla se detallan valores de K_c mensuales que pueden usarse dependiendo del ciclo fenológico del cultivo.

Tabla 12. Valores de Kc inicial, medio, final y por mes, para varios cultivos.

Cultivos	Pr (mm)	p (%)	F1	F2	F3	F4	Ciclo	Kc-1	Kc-2	Kc-3	Kc por mes											
											1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Aguacate	1000	0.35	20	90	60	90	260	0.6	0.85	0.75	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85
Alfalfa	1000	0.55	10	20	20	10	60	0.4	0.95	0.9	0.6	0.94	0.9	0.6	0.94	0.9	0.6	0.94	0.9	0.6	0.94	0.9
Algodón	1350	0.65	30	50	60	55	195	0.35	1.2	0.6	0.35	0.61	1.08	1.2	1.17	0.9	0.9	0.6				
Arroz	750	0.2	30	30	60	30	150	1.05	1.2	0.75	1.05	1.13	1.2	1.2	1.07							
Arveja	800	0.4	20	30	35	15	100	0.5	1.15	1.1	0.55	1.02	1.15	1.12								
Banano	700	0.35	120	60	180	5	365	1	1.2	1.1	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2
Berenjena	800	0.45	30	40	40	20	130	0.6	1.05	0.9	0.6	0.77	1.03	1.04	0.93							
Brócoli	500	0.45	35	45	40	15	135	0.7	1.05	0.95	0.7	0.78	1	1.05	0.99							
Cacao	700	0.3	30	50	180	60	320	1	1.1	1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1
Café	900	0.4	30	50	180	60	320	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1
Calabaza	1250	0.35	20	30	30	20	100	0.5	1	0.8	0.54	0.9	0.99	0.85								
Caña de Azúcar	1200	0.65	30	50	180	60	320	0.4	1.25	0.75	0.4	0.66	1.13	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.22	1	0.81	
Cebolla	450	0.3	15	25	70	40	150	0.7	1.05	0.75	0.76	1.03	1.05	1.04	0.8							
Cítricos	1200	0.5	60	90	120	95	365	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85
Espárragos	1500	0.45	50	30	100	50	230	0.5	0.95	0.3	0.5	0.53	0.85	0.95	0.95	0.95	0.95	0.72				
Fréjol	450	0.45	20	30	40	20	110	0.4	1.15	0.35	0.45	1	1.15	0.49								
Fresa	250	0.2	35	60	150	120	365	0.4	0.85	0.75	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85
Frutales	1000	0.5	20	70	90	30	210	0.8	1.2	0.85	0.81	0.95	1.11	1.2	1.2	1.2	0.91					
Girasol	800	0.45	25	35	45	25	130	0.35	1.15	0.35	0.37	0.82	1.15	1.01	0.48							
Habas	600	0.45	20	30	35	15	100	0.5	1.15	0.3	0.55	1.02	1.13	0.58								
Maíz	1000	0.55	30	40	50	50	170	0.7	1.2	0.6	0.7	0.89	1.18	1.2	1	0.7						
Maní	750	0.5	30	40	50	50	170	0.4	1.15	0.6	0.4	0.7	1.15	1.15	0.96	0.7						
Melón	800	0.4	25	35	40	20	120	0.5	0.85	0.6	0.51	0.71	0.85	0.74								
Mora	600	0.5	20	50	90	20	180	0.3	1.05	0.5	0.33	0.68	1.02	1.05	1.05	0.79						
Papas	500	0.35	45	30	70	20	165	0.5	1.15	0.75	0.5	0.57	0.98	1.05	1.04	0.84						
Pastos	1000	0.6	25	25	15	10	75	0.4	1.05	0.85	0.42	0.89	0.92	0.42	0.89	0.92	0.42	0.89	0.92	0.42	0.89	0.92
Pimiento	500	0.3	30	35	40	20	125	0.6	1.05	0.9	0.6	0.89	1.04	1.02	0.91							
Piña	500	0.5	60	115	180	10	365	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Remolacha	600	0.5	25	30	25	10	90	0.5	1.05	0.95	0.51	0.94	1.04	0.95								
Sandía	800	0.4	20	30	30	30	110	0.4	1	0.75	0.44	0.92	0.99	0.83								
Soya	800	0.5	20	30	60	25	135	0.5	1.15	0.5	0.54	0.94	1	0.96	0.63							
Tomate Riñón	700	0.4	30	40	40	25	135	0.6	1.15	0.8	0.6	0.92	1.23	1.12	0.89							
Trigo	1250	0.55	20	60	70	30	180	0.4	1.15	0.4	0.43	0.82	1.06	1.15	1.15	0.74						
Uvas	1000	0.35	20	40	120	60	240	0.3	0.85	0.45	0.33	0.72	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.54				
Papaya	600	0.4	32	155	55	51	293	0.9	1.1	0.9	0.9	0.93	0.96	1	1.04	1.08	1.08	1.1	1.03	0.93		
Café	900	0.4	89	123	101	52	365	1.04	1.01	0.92	1.04	1.04	1.04	1.03	1.02	1.02	1.01	1.01	1.01	1	1	
Piña	500	0.5	90	30	180	60	360	0.5	0.78	0.57	0.5	0.5	0.5	0.64	0.78	0.78	0.78	0.78	0.78	0.78	0.74	0.61
Cebolla	450	0.3	30	60	30	20	140	0.86	1.06	0.93	0.86	0.94	1.01	1.06	0.99							
Maíz	1000	0.55	20	60	50	30	160	0.21	1.06	0.96	0.24	0.68	0.96	1.06	1.05	0.26						
Habas	600	0.45	30	30	50	20	130	0.55	1.08	0.72	0.55	0.92	1.08	1.04	0.38							

Fuente: Allen et al. 2006.



Tema 2. ¿Cómo cuantificar el balance hídrico a partir de los requerimientos hídricos de los cultivos?

El balance hídrico para uso agrícola calcula las necesidades hídricas de los cultivos con base en la cuantificación de las componentes de ingresos y egresos y de la variación que se produce en la reserva de agua del suelo.

En la plataforma CROPWAT el cálculo de las necesidades de agua de los cultivos (RAC) se obtiene a partir de la información de ETo, factor Kc y precipitación efectiva (P_efect).

$$\text{RAC} = \text{ETc} - \text{P_efec} \quad \text{Ec. (4)}$$

En función del cálculo efectuado a través de la ecuación (4), se conoce las necesidades de riego.

Ejemplo: Requerimiento de agua del cultivo arroz en el área agrícola de la Asociación de regantes “El Mate”, cantón Santa Lucía, provincia Guayas – Ecuador.

Requerimiento de Agua del Cultivo							
Estación ETo M1207				Cultivo Rice			
Est. de lluvia M1207				Fecha de siembra 15/10			
Mes	Decada	Etapas	Kc coef	ETc mm/día	ETc mm/dec	Prec. efec mm/dec	Req.Riego mm/dec
Sep	2	Almá	1.20	0.65	3.9	1.9	2.3
Sep	3	Almá/PS	1.12	3.74	37.4	2.8	126.3
Oct	1	Almá/PS	1.06	5.80	58.0	1.3	186.7
Oct	2	Inic	1.09	5.91	59.1	0.4	115.9
Oct	3	Inic	1.10	6.03	66.4	4.3	62.0
Nov	1	Des	1.11	6.12	61.2	7.5	53.7
Nov	2	Des	1.14	6.33	63.3	10.3	53.0
Nov	3	Des	1.17	6.43	64.3	18.6	45.7
Dic	1	Med	1.19	6.48	64.8	29.7	35.1
Dic	2	Med	1.19	6.42	64.2	38.5	25.7
Dic	3	Med	1.19	6.41	70.6	37.1	33.4
Ene	1	Med	1.19	6.41	64.1	32.8	31.3
Ene	2	Fin	1.17	6.29	62.9	31.6	31.3
Ene	3	Fin	1.10	6.00	66.1	38.9	27.1
Feb	1	Fin	1.04	5.71	57.1	50.4	6.7
Feb	2	Fin	1.01	5.58	5.6	5.8	5.6
					869.0	311.9	842.0

Figura 23. Requerimiento hídrico de un cultivo de arroz en el área agrícola de interés, cantón Santa Lucía, provincia Guayas – Ecuador, obtenido en la plataforma CROPWAT

La Figura 23 indica que la precipitación efectiva no cubre los requerimientos del cultivo de arroz sin el apoyo de un sistema de riego. Los **requerimientos de riego** se calculan de restarle las **precipitaciones efectivas** (ingresos) a la **evapotranspiración** del cultivo Etc (consumos), estas a su vez resultan de multiplicar la evapotranspiración del cultivo de referencia Eto por el **coeficiente específico del cultivo Kc**.

Ejemplo: Resumen de la figura 23. La ETc anual son 869 mm (o 869 litros/m²), la precipitación efectiva es de 311.9 mm y los requerimientos de riego son 842 mm (842 litros/m² o 8420 m³/hectárea y año).



Para la aplicación CROPWAT, el cálculo de RAC, se lleva a cabo por periodos de 10 días (dec). Según la Figura 23, la primera columna indica los meses en los cuales se produjo el cultivo; la segunda columna indica las décadas, es decir, los meses divididos en valores decadiarios – 10 días (dec), por lo tanto, un mes se divide en tres décadas ya que el mes tiene 30 días. La tercera columna indica la etapa de crecimiento del cultivo. El Kc, varía de acuerdo con las características de los cultivos en su ciclo de vida; por lo tanto, cambia desde la siembra hasta la cosecha.

Ejemplo: Figura 23. La siembra de arroz inició a partir de la segunda década de octubre el día 15, la segunda columna indica que duro 10 días (1 década), es por ello que al multiplicar la ETc 5.91 mm/día por 10 días se obtiene un valor de ETc 59.1 mm/dec; posteriormente la tercera década de octubre constituye 11 días ya que comprende desde el día 20 al 31, entonces al multiplicar la ETc 6.03 mm/día por 11 días, se obtiene un resultado de ETc 66.4 mm/dec, respectivamente. De esta manera, las décadas se calcula de acuerdo a número de días que comprende el mes.

Respecto a la precipitación efectiva (P_efec), para convertir los datos mensuales (descritos en la Figura 23) en valores decadiarios, el programa CROPWAT realiza una interpolación lineal. Los valores para la primera y tercera décadas de cada mes se calculan por interpolación con el mes anterior y posterior, respectivamente. Para compensar las desviaciones en los meses máximo y mínimo, se lleva a cabo una reiteración para cumplir con la condición de que los tres valores decadiarios promedian la media mensual.

El requerimiento de riego (Req. riego), es el volumen de riego que necesita el cultivo, su cálculo se basa en la diferencia entre la ETc mm/dec y la P_efec. Este valor es cero si la precipitación efectiva es mayor que el requerimiento de agua del cultivo en determinado momento, de otro modo este es igual a la diferencia entre los requerimientos de agua del cultivo y la lluvia efectiva.

Ejemplo: Figura 23. Para la etapa inicial en la tercera década del mes de octubre, el arroz tiene una ETc de 63.4 mm/dec menos 4.3 mm/dec de P_efec, resulta en 62.0 mm/dec de agua que necesita el cultivo. Por lo tanto, el arroz en la tercera década del mes de octubre requerirá una lámina de agua de 62.0 mm/dec y al finalizar su periodo de crecimiento 5.6 mm/dec, quiere decir que todo su consumo debe ser abastecido por un sistema de riego.

Las necesidades de agua de riego, expresadas en mm/dec, para un plan de cultivo determinado deben ser comparadas con el abastecimiento de agua disponible en la fuente de agua, que debe ser el equivalente al caudal autorizado para el aprovechamiento y uso del agua entregado por la entidad rectora del agua. En el caso de contar con una autorización de caudal que no suple los requerimientos de riego se debe evaluar la alternativa de cambiar de cultivo o el mecanismo de riego.

Ejemplo: La Asociación de regantes “El Mate” que desea mejorar el sistema de riego parcelario de un cultivo de arroz en el área agrícola de interés del cantón Santa Lucía, provincia Guayas – Ecuador, posee una autorización de uso y aprovechamiento de agua de 110.77 l/s.

Para la transformación de litros por segundo a milímetros / dec, se debe conocer el área agrícola donde se desea cultivar en metros cuadrados.



Ejemplo: El área agrícola de interés de la Asociación de regantes “El Mate” del cantón Santa Lucía, provincia Guayas – Ecuador, donde se cultiva arroz posee una superficie de 10,037,814.00m². El caudal autorizado para la asociación de regantes de 110.77 l/s equivalen a 9,5 mm/dec, quiere decir que es un caudal insuficiente para cubrir los requerimientos de riego actuales del área agrícola de interés.

Para el caso de ejemplo, el balance hídrico indica que existe un déficit de agua. Sin embargo, la autorización de aprovechamiento y uso de agua en la fuente de abastecimiento no cubre los requerimientos de riego para todo el ciclo de cultivo de arroz. Esta conclusión debe aportar a la toma de decisiones sobre cambiar el cultivo, diversificar el plan de cultivo o explorar un sistema de riego tecnificado que optimice el consumo de agua del cultivo.

En Resumen

Este último capítulo abordó el tema de los requerimientos hídricos de los cultivos, determinado como la pérdida de humedad que sufre el suelo por evaporación, más la pérdida de agua por transpiración de un cultivo en condiciones reales.

Para calcular la ETC, hay que identificar las etapas de crecimiento del cultivo, su duración, y seleccionar el coeficiente Kc adecuado. Esta última variable, es el coeficiente de cultivo que está relacionado a varias características de los diferentes cultivos como: fecha de siembra o plantación, el ritmo de desarrollo de cultivo, la duración del período vegetativo, las condiciones climáticas, etc.

Existen 4 valores de Kc relacionados a las etapas fenológicas de los cultivos: i) Kc inicial, ii) Kc desarrollo, iii) Kc medio, iv) final. A nivel del país, existe muy poca información relacionada a valores de Kc de los cultivos, razón por la cual se utiliza los valores determinados por FAO, mismos que están disponibles en la plataforma informática Cropwat.

Finalmente, el balance hídrico para uso agrícola calcula las necesidades hídricas de los cultivos con base en la cuantificación de las componentes de ingresos y egresos y de la variación que se produce en la reserva de agua del suelo.

En la plataforma CROPWAT el cálculo de las necesidades de agua de los cultivos (RAC) se obtiene a partir de la información de ETo, factor Kc y precipitación efectiva (P_efect).



IV. BIBLIOGRAFÍA

- Alcobendas, J., Moreno, M. 2005. Necesidades de riego. Castilla, ES. Publicaciones la Mancha UCLM. p. 12.
- Allen, R.G., L. S. Pereira, D., Raes y Smith, M. (2006). Evapotranspiración del cultivo, 298pp., Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos, Estudio FAO Riego y Drenaje, No. 56, Roma, Italia.
- Basualdo, Adriana B. Manual de buenas prácticas para la generación, el almacenamiento y la difusión de información climática en instituciones y organismos del MERCOSUR / Adriana B. Basualdo -- San José: C.R.: IICA, 2015. 82 p. Disponible en: <http://repositorio.iica.int/bitstream/11324/2549/1/BVE17038646e.pdf>
- Bishop, C. (1997). Neural Networks for Pattern Recognition. OxfordUniversity Press.Hertz, J.; Krogh, A. y Palmer, G. (1991). Introduction to the Theory of Neural Computation, Addison-Wesley
- Copa, R., y Miranda, R. Propiedades hidrofísicas del suelo para implementar sistemas de riego en medio semiárido (Centro Rivera-Altiplano Central Boliviano). RIIARn [online]. 2014, vol.1, n.1 [citado 2019-10-14], pp. 73-80. Disponible en: <http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2409-16182014000100010&lng=es&nrm=iso>. ISSN 2409-1618.
- FAO. 2009. Guía para la descripción de suelos - Cuarta edición. Roma.
- Flores, L. Manual de Procedimientos Analíticos Laboratorio de Física de Suelos. (Universidad Nacional Autónoma De México. Instituto de Geología Departamento de Edafología). 2010. Disponible en: <http://www.geologia.unam.mx/igl/deptos/edafo/lfs/MANUAL%20DEL%20LABORATORIO%20DE%20FISICA%20DE%20SUELOS1.pdf>
- Graetz, H. A., 1997. Suelos y Fertilización. Traducido por: F. Luna Orozco. Trillas. México. 80 p.
- Julca, A., Meneses, L., Blas, R. y Bello, S. La materia orgánica, importancia y experiencia de su uso en la agricultura. Idesia [online]. 2006, vol.24, n.1 [citado 2019-10-14], pp.49-61. Disponible en: <https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-34292006000100009&lng=es&nrm=iso>. ISSN 0718-3429. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292006000100009>.
- Larrea, D. 2017. Estudio agrológico de las áreas de riego dentro del sistema de riego Alor – El Rosal, Carchi, Ecuador. 57p
- Salamanaca, J., Sadeghian, KH. La densidad aparente y su realción con otras propiedades en los suelos de la zona cafetera colombiana. Cenicafe 56(4): 381-397. 2005. Disponible en: <https://www.cenicafe.org/es/publications/arc056%2804%29381-397.pdf>
- Vazquez, G. (2015). Introducción y Tutorial en español al programa “Soil Water Characteristics” Hydraulic Properties Calculator (Saxton y Rawls) para estudiantes de la Maestría de Cuencas Hidrográficas de la Univ Nac de La Plata.. 10.13140/RG.2.1.2709.5527. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/282119926_Introduccion_y_Tutorial_en_espanol_al_programa_Soil_Water_Characteristics_Hydraulic_Properties_Calculator_Saxton_y_Rawls_para_estudiantes_de_la_Maestria_de_Cuencas_Hidrograficas_de_la_Univ_Nac_de_La_P



V. GLOSARIO

Error cuadrático medio: En estadística el error cuadrático medio (ECM) de un estimador mide el promedio de los errores al cuadrado, es decir, la diferencia entre el valor estimado y lo que se estima.

Librería: En informática, una librería es un conjunto de funciones, codificadas en un lenguaje de programación, que facilita la ejecución de un objetivo concreto.

Precipitación efectiva (P_efec): La precipitación total que recibe un suelo infiltrará en mayor o menor proporción de acuerdo con una serie de factores entre los que figuran: la pendiente, la vegetación que lo cubre, la textura, el contenido de humedad de las capas superficiales, la intensidad y cantidad de agua caída, etc. Se da así lugar, al concepto de precipitación efectiva, que es aquella fracción de la precipitación ocurrida que ingresa finalmente al suelo. Los métodos para estimar la cantidad de agua que se añade al almacenaje de un suelo con cada precipitación son muchos y cada uno de ellos toma sólo algunos de los factores mencionados, por lo que sus resultados suelen ser dispares. La utilización de uno u otro método, queda a elección del técnico, de acuerdo con los datos que se posean de la zona en estudio, o a la mayor o menor confiabilidad que le merezcan los mismos. También puede realizarse el cálculo por distintos métodos y tomar luego el promedio de los resultados obtenidos.

Vector Regional: Método práctico que permite tener una fórmula lineal, la cual relaciona posición y elevación con la precipitación en cualquier parte de la cuenca, tomando como referencia valores observados.



VI. ANEXOS

Indicadores del suelo para identificar su capacidad productiva y de riego.

Textura

En el ámbito agrícola, la textura es un parámetro fundamental del cual depende en alto grado el comportamiento hidrodinámico del suelo, juega un papel fundamental en el cálculo de láminas de riego, de lavado de sales y en el diseño de sistemas de riego. La clasificación textural del suelo se presenta en la siguiente tabla.

Tabla 1. Clasificación de texturas del suelo

Textura	Diámetro partículas (mm)
Suelos arenosos	0.02 a 0.2
Suelos limosos	0.02 a 0.002
Suelos arcillosos	< 0.002
Suelos francos	Todos los diámetros

La textura de un suelo tiene un efectivo directo y restrictivo sobre las propiedades hidrológicas del mismo, afectando su densidad aparente, niveles de humedad del suelo, porosidad, movimiento del agua en el suelo. Así en la siguiente tabla, se presenta la *relación de la textura del suelo con el comportamiento y capacidad de almacenamiento del agua en el suelo*:

Tabla 2. Características de los suelos en función de su clase textural

Textura	Conductividad hidráulica (cm/hr)	Porosidad (%)	Densidad aparente (Mg/m ³)	CC (% en peso)	PMP (% en peso)	CRAD (% en vol)
Arenoso	5 (2.5-25)	38 (32-42)	1.65 (1.55-1.8)	9 (5-16)	4 (2-6)	8 (6-10)
Franco arenoso	2.5 (1.3-7.6)	43 (40-47)	1.5 (1.4-1.6)	14 (10-20)	6 (4-8)	12 (9-15)
Franco	1.3 (0.8-2.0)	47 (43-49)	1.4 (1.35-1.5)	22 (15-30)	10 (8-12)	17 (14-20)
Franco arcilloso	0.8 (0.25-1.5)	49 (47-54)	1.35 (1.3-1.4)	27 (25-35)	13 (11-15)	19 (16-22)
Arcillo limoso	0.25 (0.03-0.5)	51 (49-53)	1.3 (1.3-1.4)	31 (27-40)	15 (13-17)	21 (18-23)
Arcilloso	0.05 (0.01-1.0)	53 (51-55)	1.25 (1.2-1.3)	35 (30-70)	17 (15-19)	23 (20-25)

CC, capacidad de campo; PMP, punto de marchitamiento permanente; CRAD, capacidad de retención de agua disponible. Los valores entre paréntesis corresponden al rango más común.

Fuente: <http://www.geologia.unam.mx/igl/deptos/edafo/lfs/MANUAL%20DEL%20LABORATORIO%20DE%20FISICA%20DE%20SUELOS1.pdf>.

Estructura

Se llama estructura del suelo a la disposición de sus partículas para formar otras de mayor tamaño o agregados. La permeabilidad de un suelo al aire, agua y penetración de las raíces depende sobre todo de su textura y estructura. Al contrario que la textura, la estructura se puede modificar mediante prácticas culturales y una buena ordenación de los cultivos. De manera general, se pueden encontrar diferentes clases de estructuras en un suelo. En la siguiente tabla, se resumen dichas estructuras.

Tabla 3. Clasificación por estructuras del suelo

Estructura	Descripción
Granulares y migajosas	Partículas individuales de arena, limo y arcilla agrupadas en granos pequeños casi esféricos. El agua circula muy fácilmente a través de esos suelos. Por lo general, se encuentran en el horizonte A de los perfiles de suelos.
Bloques o bloques subangulares	Partículas de suelo que se agrupan en bloques casi cuadrados o angulares con los bordes más o menos pronunciados. Los bloques relativamente grandes indican que el suelo resiste la penetración y

	el movimiento del agua. Suelen encontrarse en el horizonte B cuando hay acumulación de arcilla.
Prismáticas y columnares	partículas de suelo que han formado columnas o pilares verticales separados por fisuras verticales diminutas, pero definidas. El agua circula con mayor dificultad y el drenaje es deficiente. Normalmente se encuentran en el horizonte B cuando hay acumulación de arcilla.
Laminar	Se compone de partículas de suelo agregadas en láminas o capas finas que se acumulan horizontalmente una sobre otra. A menudo las láminas se traslapan, lo que dificulta notablemente la circulación del agua. Esta estructura se encuentra casi siempre en los suelos boscosos, en parte del horizonte A y en los suelos formados por capas de arcilla.

Fuente: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/8010/estructura.pdf>

La estructura junto con la textura, tienen una relación directa con la porosidad del suelo. A su vez, esta propiedad condiciona el comportamiento y capacidad de almacenamiento del agua en el suelo



BUENA CONDICIÓN CV = 2
El suelo presenta una estructura pulverizable con predominio de agregados finos sin presencia significativa de terrones.

CONDICIÓN MODERADA CV=1
El suelo presenta una proporción significativa (50 %) de terrones densos, firmes y de agregados friables, finos.

CONDICIÓN POBRE CV = 0
Estructura del suelo dominada por bloques grandes, densos, angulares o terrones sub-angulares, con muy pocos agregados finos.

Fuente: <https://www.portalfruticola.com/noticias/2016/12/14/guia-tecnica-de-campo-para-la-evaluacion-visual-de-los-suelos/>

Figura 1. Condiciones del suelo según su estructura.

En la Figura 1, se puede observar que un suelo con estructura dominada por bloques grandes tiene una porosidad dominada por macroporos, en tanto que, un suelo con estructura con agregados finos presenta una porosidad dominada por microporos.

La porosidad tiene efectos sobre el movimiento y almacenamiento del agua en el suelo. Los macroporos drenan con facilidad el agua, en tanto que los microporos, retienen con gran fuerza el agua en el perfil del suelo. Algunas características de los poros se presentan en la siguiente tabla.



Tabla 4. Influencia del tamaño y función de los poros en la capacidad de almacenamiento de agua.

Tamaño de los poros (mm diámetro)	Descripción de los poros	Funciones de los poros
<0,0002	Residual	Retienen agua que las plantas no pueden usar
0,0002-0,05	Almacenamiento	Retienen agua que las plantas pueden usar (PPM=0,0002 mm; CC=0,05 mm; pero CC puede variar de 0,03 a 0,1 de diámetro equivalente a 10 a 33 kPa)
>0,05	Transmisión	Permite que el agua drene y que entre el aire
>0,1 a 0,3	Enraizamiento	Permite que las raíces de las plantas penetren libremente (Tamaño de las raíces: raíces seminales de cereales >0,1 mm; extremo de raíces de no cereales (dicotiledóneas) >0,3 mm; barbas absorbentes 0,005 a 0,01 mm)
0,5-3,5	Canal de lombrices	Permiten que el agua drene y que entre el aire
2-50	Nidos de hormigas y canales	Permiten que el agua drene y que entre el aire

Fuente: <https://www.madrimasd.org/blogs/universo/2007/03/20/61764>

Un suelo de textura arenosa y buena estructura presenta una menor porosidad, dominada por macroporos, lo que favorece la percolación del agua a través del perfil y su capacidad de almacenamiento de agua es bajo. Al otro extremo, un suelo arcilloso, con mayor porosidad que el arenoso, y dominado por meso y microporos, tiene una menor capacidad de drenar rápido el agua, pero su capacidad de almacenamiento de agua es alto, en relación al suelo arenoso.

Densidad Aparente

La densidad aparente (DA) es la propiedad física que en mayor grado influye sobre la productividad de los cultivos, debido a su estrecha relación con las otras propiedades del suelo. Incluso, en algunas especies ejerce un mayor efecto que el mismo uso de fertilizantes, el cual puede ser más notable cuando no se aplican. Este comportamiento está asociado con las condiciones de disponibilidad de agua y la de difusión de los nutrientes en el suelo (Salamanca, 2005).

La densidad aparente a través de su condición con la porosidad tiene una estrecha relación con el comportamiento y capacidad de almacenamiento del agua en el suelo, así en la siguiente tabla se detallan valores de porosidad de diferentes tipos de suelos con densidades aparentes distintas:

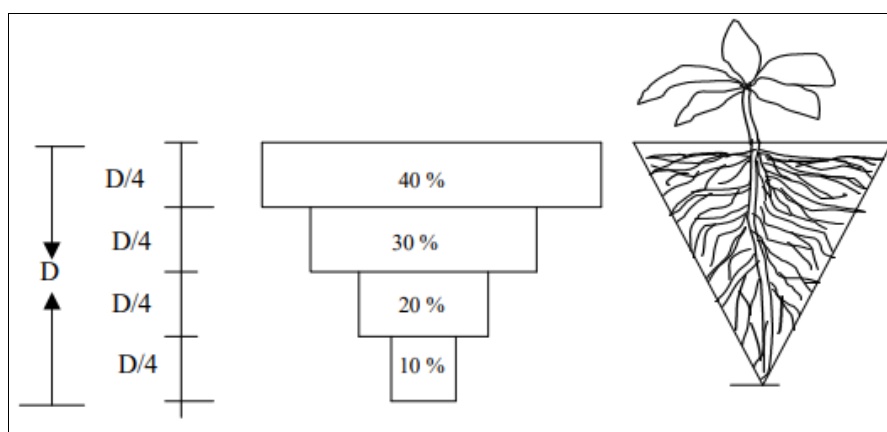
Tabla 5. Valores de porosidad de diferentes tipos de suelos con densidades aparentes distintas.

	D_a (Mg*m ⁻³)		EP, n (%)		NP, ε (°)	
Suelos arenosos	1,67	1,19	37	55	0,58	1,22
Suelos francos	1,96	1,19	26	55	0,15	1,22
Suelos limosos	1,53	1,19	42	55	0,72	1,22
Suelos arcillosos	1,32	0,92	50	65	1,00	1,85
Suelos volcánicos	0,85	0,20	69	91	2,20	11,00
Suelos orgánicos	0,48	0,12	60	90	1,50	9,00

Cuando la densidad aparente del suelo aumenta, se incrementa la compactación y se afectan las condiciones de retención de humedad, limitando a su vez el crecimiento de las raíces. La DA es afectada por las partículas sólidas y por el espacio poroso, el cual a su vez está determinado principalmente por la materia orgánica del suelo (MO). A medida que aumentan la MO y el espacio poroso, disminuye la DA y viceversa. En los suelos de textura fina arcillosa la DA varía entre 1 y 1.2 mg.m^{-3} , mientras que en suelos arenosos es mayor y puede variar entre 1.2 y 1.6 mg.m^{-3} , como se indica en la Tabla 5.

Profundidad Efectiva

Para efectos de programación del riego, es necesario conocer la profundidad a la cual las raíces extraen agua del suelo. El patrón típico de distribución de raíces de un cultivo se asemeja a un triángulo equilátero invertido, tal como se muestra en la siguiente figura. Según esta Figura, el 70% de la humedad extraída por el cultivo proviene de un medio superior de la zona radicular (2/4); por eso se considera como profundidad efectiva entre 70 y 80 % de la profundidad total de raíces (un valor práctico es 70 por ciento).



Fuente: http://www.fao.org/tempref/GI/Reserved/FTP_FaoRlc/old/prior/recnat/pdf/MR_cap1.PDF

Figura 2. Patrón típico de extracción de agua de un cultivo.

Pedregosidad

La pedregosidad superficial desde el punto de vista de la utilización del suelo es importante para el cultivo por su acción sobre los aperos de labranza, llegando a impedir la misma cuando su contenido es muy elevado. En las tierras vírgenes es un factor negativo porque disminuye la superficie útil para el crecimiento vegetal.

Las zonas pedregosas, desde el punto de vista de la conservación del suelo, pueden llegar a ser eficaces porque cuando la vegetación es escasa el golpeo de las gotas de agua sobre las piedras protege al suelo de la dispersión y arrastre de partículas.

La pedregosidad se puede clasificar en función del cubrimiento en la superficie del suelo, así como se detalla en la siguiente tabla.

Tabla 6. Características del suelo y su manejo en función de los tipos de pedregosidad

Pedregosidad	Descripción	Efectos de manejo
No o muy poco pedregoso	Las piedras cubren < 0.01 %.	No interfiere la labranza.



Moderadamente pedregoso	Las piedras cubren hasta un 0.1 % Piedras y pedregones separados de 10 a 30 m.	Interfiere en la labranza, pero no impide las labores.
Pedregoso	Las piedras cubren hasta un 3% Piedras y pedregones separados de 1.6 a 10 m.	Dificulta las labores y solo permite algunas
Muy pedregoso	Las piedras cubren hasta un 15 % Piedras y pedregones separados de 0.75 a 1.6 m.	Impide el uso de maquinaria pesada, permite el uso de maquinaria ligera o a mano
Excesivamente pedregoso	Las piedras cubren hasta un 90 % Piedras y pedregones separados < 0.75 m.	Impide el uso de todo tipo de maquinaria.
Ripioso	Las piedras cubren > 90 %	Pavimentado con piedras.

La pedregosidad es un factor de restricción para cuantificar el Agua Potencialmente Disponible Neta (ADP) que se aplica al cálculo de Agua Disponible. Así, en la siguiente tabla se detallan los factores de restricción en función de la pedregosidad.

Tabla 7. Factores de restricción que se aplican al cálculo de Agua Disponible en función de los tipos de pedregosidad

Rocosidad	Pedregosidad	Factor de restricción
Nula	Nula	1.00
Ligeramente rocosa	Ligeramente pedregosa	0.85
Moderadamente rocosa	Moderadamente pedregosa	0.80
Rocosa	Pedregosa	0.70
Muy Rocosa	Muy pedregosa	0.50

Fuente: <http://www.inia.uy/Publicaciones/Documentos%20compartidos/111219220807174344.pdf>

Contenido de Materia Orgánica

La materia orgánica tiene efectos sobre las propiedades físicas del suelo, formando agregados y dando estabilidad estructural, uniéndose a las arcillas y formando el complejo de cambio, favoreciendo la penetración del agua y su retención, disminuyendo la erosión y favoreciendo el intercambio gaseoso. Cuando se refiere al efecto sobre las propiedades químicas del suelo, los autores mencionan que aumenta la capacidad de cambio del suelo, la reserva de nutrientes para la vida vegetal y la capacidad tampón del suelo favorece la acción de los abonos minerales y facilita su absorción a través de la membrana celular de las raicillas. Y en cuanto a su efecto sobre las propiedades biológicas, favorece los procesos de mineralización, el desarrollo de la cubierta vegetal sirve de alimento a una multitud de microorganismos y estimula el crecimiento de la planta en un sistema ecológico equilibrado. (Graetz, 1997).

Sobre las propiedades físicas relacionadas con el movimiento y capacidad de almacenamiento del agua, la materia orgánica tiene un efecto estabilizador de los agregados del suelo, es decir, de la estructura, lo que a su vez tiene un efecto sobre la porosidad, densidad aparente y la conductividad hidráulica. Así, en las siguientes tablas, se presentan algunas características de suelos sin y con aplicación de materia orgánica y su efecto sobre las propiedades físicas.



Tabla 8. Porosidad total, macro y microporosidad del suelo con y sin aplicación de materia orgánica a diferentes profundidades.

Materia orgánica (estiércol)	Profundidad (cm)	Porosidad total (%)	Macroporosidad (%)	Microporosidad (%)
Sin aplicación de materia orgánica	0-10	49,57 ^a	36,61 ^a	12,95 ^b
	10-20	49,23 ^a	36,20 ^a	13,03 ^b
	20-30	53,97 ^a	38,58 ^a	15,39 ^{ab}
Con aplicación de materia orgánica	0-10	54,28 ^a	37,00 ^a	17,27 ^a
	10-20	55,16 ^a	38,30 ^a	16,85 ^{ab}
	20-30	50,65 ^a	36,27 ^a	14,38 ^{ab}

Fuente: <https://pdfs.semanticscholar.org/ce87/25aead755f2c7f7277267fd87d5f4262c5d5.pdf>

Tabla 9. Densidad aparente y conductividad hidráulica del suelo con y sin aplicación de materia orgánica a diferentes profundidades.

Materia orgánica (estiércol)	Profundidad (cm)	Densidad aparente (g cm ⁻³)	Conductividad hidráulica (cm.h ⁻¹)
Sin aplicación de materia orgánica	0-10	1,24 ^a	1,32 ^{ab}
	10-20	1,24 ^a	1,25 ^b
	20-30	1,14 ^a	2,75 ^a
Con aplicación de materia orgánica	0-10	1,07 ^a	2,35 ^{ab}
	10-20	1,09 ^a	1,38 ^{ab}
	20-30	1,13 ^a	2,57 ^{ab}

Fuente: <https://pdfs.semanticscholar.org/ce87/25aead755f2c7f7277267fd87d5f4262c5d5.pdf>