

Estimación de los niveles de salinidad de los suelos de la cuenca del río Chancay usando datos EVI y NDVI

Estimation of salinity levels in the soils of the chancay river basin using EVI and NDVI data

Mervin O. Becerra Solano¹; Eleazar M. Rufasto Campos²; Joel Rojas Acuña³; Segundo V. Carbajal Fanso⁴

¹Bach. Mervin O. Becerra Solano
Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo Lambayeque, Perú.
Correo electrónico: mbecerra@unprg.edu.pe

²MS.c. Eleazar M. Rufasto Campos
<https://orcid.org/0000-0001-9214-1852>
Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo Lambayeque, Perú.
Correo electrónico: erufasto@unprg.edu.pe

³Dr. Joel Rojas Acuña
<https://orcid.org/0000-0001-9722-7890>
Universidad Nacional Mayor de San Marcos
Correo electrónico: jrojasa@unmsm.edu.pe

⁴MS.c. Segundo Valdemar Carbajal Fanso
Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo Lambayeque, Perú.
Correo electrónico: scarbajal@unprg.edu.pe
<https://orcid.org/0000-0001-6852-2209>

Resumen

La región Lambayeque ubicada al norte del Perú es una zona intensamente agrícola, su economía es principalmente sostenida por la agricultura y los servicios. Valle irrigado por el río Chancay-Lambayeque se cultiva básicamente cuatro cultivos predominantes: Caña de azúcar, arroz, maíz y algodón. Estos cultivos son de alta demanda hídrica, y la zona es de clima árido y deficiente en lluvias. Estos factores tanto antrópicos como naturales han ocasionado problemas en los suelos agrícolas con la acumulación de sales solubles en valores superiores a los tolerantes por los cultivos. Se ejecutó esta investigación con el objetivo de aplicar datos de NDVI y EVI procedentes de las

imágenes MODIS usando cinco modelos de ecuaciones para encontrar la mejor relación que permita determinar la variabilidad espacial y temporal del periodo 2000 – 2017. Encontrándose que el modelo de mayor bondad fue el modelo DR-Weibull, el índice de vegetación de mayor coeficiente de correlación fue el NDVI, superando al EVI. Además, se estimó que un 32.20% de los suelos siempre han estado en el periodo de estudio con problemas de salinidad y que dependiendo de los factores de la zona se ha llegado hasta el 75% de salinización del área agrícola.

Palabras Claves: NDVI, EVI, salinidad, áreas salinizadas.

Abstract

The Lambayeque region located in northern Peru is an intensely agricultural area, its economy is mainly sustained by agriculture and services. A valley irrigated by the Chancay-Lambayeque river, four main crops are basically cultivated: sugar cane, rice, corn and cotton. These crops have a high-water demand, and the area has an arid climate and deficient rainfall. These both anthropogenic and natural factors have caused problems in agricultural soils with the accumulation of soluble salts in values higher than those tolerant by crops. This investigation was carried out with the objective of applying NDVI and EVI data from MODIS images using five equation models to find the best relationship that allows determining the spatial and temporal variability of the period 2000 - 2017. Finding that the model with the greatest goodness was the DR-Weibull model, the vegetation index with the highest correlation coefficient was the NDVI, surpassing the EVI. In addition, it was estimated that 32.20% of the soils have always been in the study period with salinity problems and that depending on the factors of the area, up to 75% salinization of the agricultural area has been reached.

Keywords: NDVI, EVI, salinity, salinized areas.

Introducción

Una de las principales cuencas de la costa peruana está en la región Lambayeque, la cuenca Chancay – Lambayeque es una cuenca compartida con la región Cajamarca donde está su nacimiento. La parte correspondiente a la región Lambayeque está regulado sus

aguas por el sistema de riego denominado Tinajones, (Proyecto Especial Olmos Tinajones [PEOT], 2020). Consta de un reservorio y sistemas de distribución.

El área irrigada por el sistema Tinajones comprende más de 136 533 hás, dentro de las cuales se cultiva principalmente cuatro cultivos como son arroz, caña de azúcar, maíz y algodón, (Banco Central de Reserva del Perú, [BCR], 2021; PEOT, 2020). Estos son cultivos que demandan volúmenes altos de agua.

La característica de la zona en general es de suelos de fisiografía plana (Instituto Nacional de Recursos Naturales, Mapa fisiográfico del Perú, 1994). El clima de toda el área de estudio está clasificada como Clima árido; deficiente de lluvias todo el año; semicálido y húmedo, cuya simbología es [E(d) B'1 H3], (SENAMHI, 2002). Además, es la principal zona agrícola de la región Lambayeque, (Gobierno Regional de Lambayeque, 2008).

En el mundo existen extensas zonas con problemas de salinidad ya sea de tipo primario o secundario, principalmente a consecuencia del riego que recibe para desarrollar la agricultura, (Lazara Otero, et al 2007). El área de la cuenca del río Chancay – Lambayeque al desarrollar agricultura intensiva bajo un sistema de riego por gravedad también afronta el problema de la salinización de sus suelos, a pesar que por medio siglo vienen realizándose trabajos para evitar el problema, (García, 2008).

El Sistema de Riego Tinajones (SRT) fue diseñado su operación en 1968 por la compañía consultora SALZGITTER,

recomendando la siembra de 17 000 hectáreas de arroz y 22 000 hectáreas de caña de azúcar (García, 2008). A la fecha esta recomendación no se cumple y se ha ampliado el rango de cobertura para estos dos cultivos, (PEOT, 2020).

El área de influencia del SRT se ubica en la Diagonal Árida Sudamericana (De Martonne, 1935; Köppen & Geiger, 1936) y al ser una zona de clima arido es altamente factible de salinizarse, ya que los suelos salinos es una característica de las zonas de clima arido o semi arido, (Richards, 1985). Se considera salino a un suelo cuando tiene exceso de sales solubles, debemos considerar también que sales son los diferentes componentes químicos que nutren a las plantas, es decir el concepto salinidad es global por lo tanto abarca a todas las sales solubles incluidas las necesarias para la nutrición de las plantas y las perjudiciales, (Moya, 2009).

Se considera a un suelo salino (definición) cuando contiene sales solubles en cantidades que reducen la productividad de los cultivos y por lo tanto llegan a tener una presión osmótica mayor de 1.5 bar, (Bornemisza, 1993). Característica que hace variar las propiedades espectrales de las plantas, (Sobrino, 2000).

Es posible identificar y cuantificar características de un objeto sin tener contacto directo con él, esta posibilidad se da usando la teledetección, (IGN, 2009; Samarakoo, 1991; USGS s.f.; Castro et al. 2010). Para ello se debe comprender la información capturada por el sensor, (Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 2007). La ciencia de suelos usa esta herramienta para investigar procesos como la erosión, degradación por salinidad,

fertilidad de los suelos, contaminación, cambio de usos y otros problemas que afectan a la producción. Estos sean abordados usando teledetección, (Castro et al. 2010). Es decir, la teledetección parte del principio de existir una perturbación que el objeto observado produce en el medio y que el sensor registra y que el usuario debe convertirlas en información útil, (Sobrino, 2000).

Los sensores remotos pueden detectar varios tipos de energía entre ellos esta: la radiación electromagnética, gravedad, magnetismo, geofísica ondas de radio y otras, siendo la más común utilizada la energía dentro del Espectro Electromagnético (EMM), (Pérez, 2007). Esta energía generadora de datos puede ser el sol o generada por el propio sensor.

La interacción de la radiación electromagnética con la materia está en función de los intervalos espectrales en los que registra el sensor por lo que la teledetección complementa la información sobre el estado de los suelos y la atmósfera. Las longitudes de onda de mayor uso son la zona visible del espectro (0.4 μm a 0.7 μm) azul, verde y rojo, y la zona de la región del infrarrojo (0.7 μm a los 100.0 μm .), (Sobrino, 2000).

Materiales y métodos

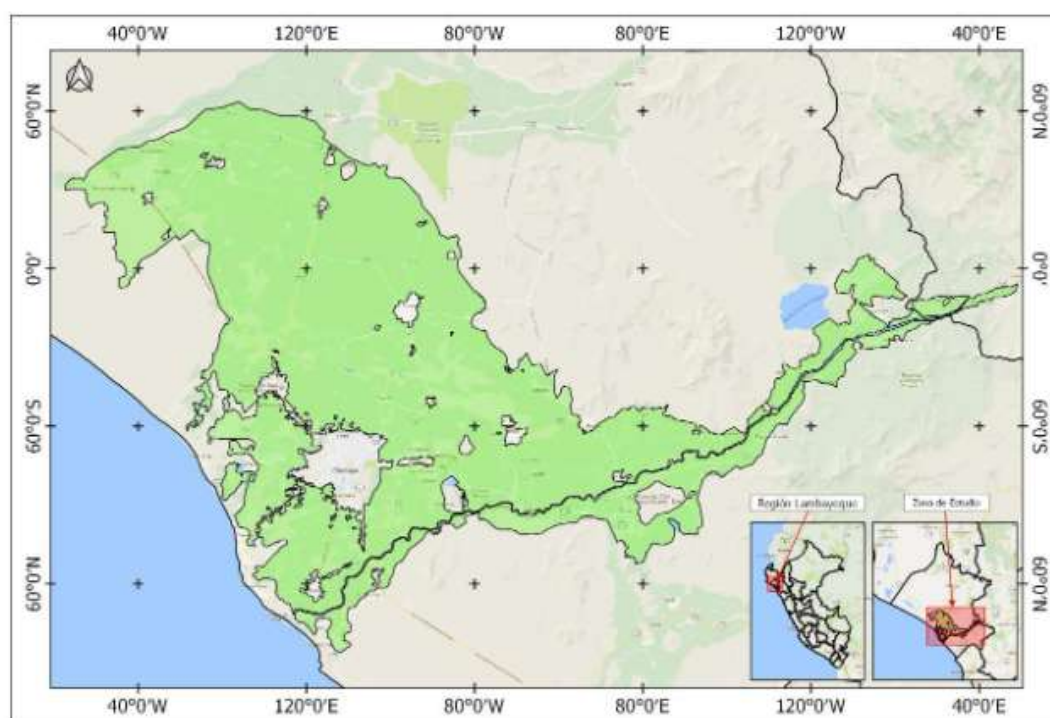
Área de estudio

El área de estudio comprendió la parte media y baja de la cuenca Chancay-Lambayeque que abarca desde la bocatoma Raca Rumi hasta el litoral. Esta zona se ubica entre las coordenadas 6°29'08.6928"S; 80°02'26.4744"W, y 6°55'04.4364"S; 79°20'54.6459"W. Según

se muestra en la figura 1. Aproximadamente tiene una extensión de

136 533 hectáreas agrícolas, (PEOT, 2020).

Figura 1. Área de estudio, comprende administración de la Junta de Usuarios de Riego de la Cuenca Chancay – Lambayeque (JURCHL).



Materiales y métodos

Los materiales usados fueron:

Imágenes MODIS, cuya descarga se hizo usando MODISTsp interfaz de lenguaje R. MODISTsp es una herramienta diseñada para simplificar la descarga de datos MODIS. Su uso puede hacerse en la descarga de series de tiempo o de fechas específicas.

Se trabajo con imágenes “16 day NDVI average” y “16 day EVI average”

Con todos los datos que se descargaron se

elaboró una base de datos de NDVI y EVI cada uno de ellos con sus respectivas coordenadas, todo esto con la finalidad de agregar en otra columna los valores de la conductividad eléctrica del suelo.

Datos de conductividad eléctrica (CE) método extracto 1:5, las muestras de suelo usadas para medir la conductividad eléctrica fueron en total de 162 muestras recolectadas de la capa arable y de cutaro fechas diferentes como se muestra en la tabla 1. Las muestras fueron recolectadas

de seis lugares diferentes pertenecientes a las comisiones de regantes de la Junta de Usuarios. La medida de salinidad de las muestras fue realizada por el método en

extracto 1:5 y medidos en unidades decisiemens por metro (dS/m).

Tabla 5. Tabla de sectores, fechas y número de muestras usadas.

Sector	Fecha de Muestreo	Número de muestras	Fecha de Imagen
Sialupe Huamantanga	jueves, 18/10/2007	30	Martes 16/10/2007
Mocce	jueves, 18/10/2007	10	Martes 16/10/2007
Monteria	sábado, 17/01/2009	11	Sábado 17/01/2009
Chacra Vieja	viernes, 7/08/2009	6	Viernes 28/08/2009
Pitipo	sábado, 7/08/2010	7	Viernes 13/08/2010
Mórrope	sábado, 6/05/2017	98	Martes 9/05/2017
Total de Muestras		162	

A todos los datos imágenes como a los valores de CE 1:5 se les calculo las medidas de tendencia central con la finalidad de conocer las condiciones estadísticas de cada una de ellas. Los datos calculados fueron: número de observaciones (n), Media, desviación estándar (D.E), coeficiente de variación (CV), valor mínimo (Mín), valor máximo (Máx) y Mediana. También se calcularon Varianza con denominador n-1 ($Var(n-1)$), varianza con denominador n ($Var(n)$), error estándar (E.E.). Todas estas medidas se hicieron usando el Software InfoStat, (Di Rienzo, 2008).

Realizado el procesamiento de las imágenes del sensor MODIS producto MOD 13Q1, estos valores de NDVI que correspondían a fechas específicas según las fechas de muestreo, pero en algunos casos las fechas de las imágenes descargadas son del mismo día de la fecha de muestreo en otros casos el factor nubosidad obligo a usar imágenes de

fechas cercanas ya sea antes o después del día de muestreo, tal como se indica en la tabla 1.

Se elaboraron mapas digitales de salinidad para ello se usó el máximo valor compuesto (MVC) del NDVI. Como producto inicial se obtuvieron archivos ráster para cada valor de conductividad eléctrica.

Resultados

Los valores de la CE de las muestras medidas clasificaron según lo que se muestra en la figura 2. El 45.6% de las muestras clasificaron como no salinas, el 17.28% como ligeramente salinas, 2.47% como suelos salinos y el 35.19 % como suelos muy salinos. Es decir más del cincuenta por ciento de las muestras de suelo analizadas clasificaron como muestras de suelos salinos. Y sus medidas de tendencia central se reportan en la tabla 2.

Figura 2.

Gráfico de frecuencias de los valores de CE medido a las 162 muestras de trabajo

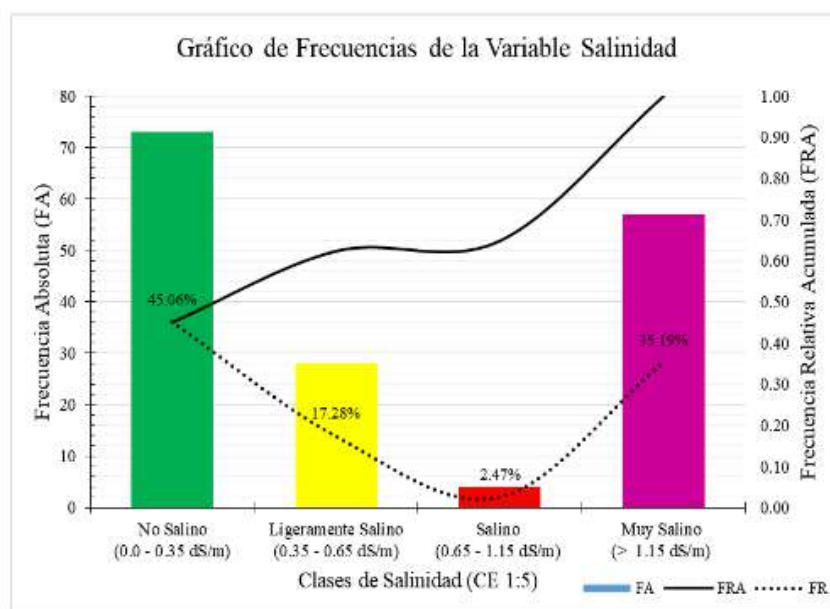


Tabla 6.

Medida de tendencia central de los valores de CE de las 162 muestras de trabajo

Variable	CE 1:5 (dS/m)
N	162
Media	2.74
D.E.	4.11
Var(n-1)	16.88
Var(n)	16.78
E.E	0.32
CV	149.8
Min	0.08
Max.	15.07
Mediana	0.43

Así mismo se realizaron medidas de tendencia central a los datos tanto del NDVI y valores del EVI. Encontrándose valores de NDVI comprendidos entre 0.151 hasta 0.665, tal como se muestra en la figura 3 y tabla 3.

Figura 3.

Gráfico de frecuencias de la variable NDVI.

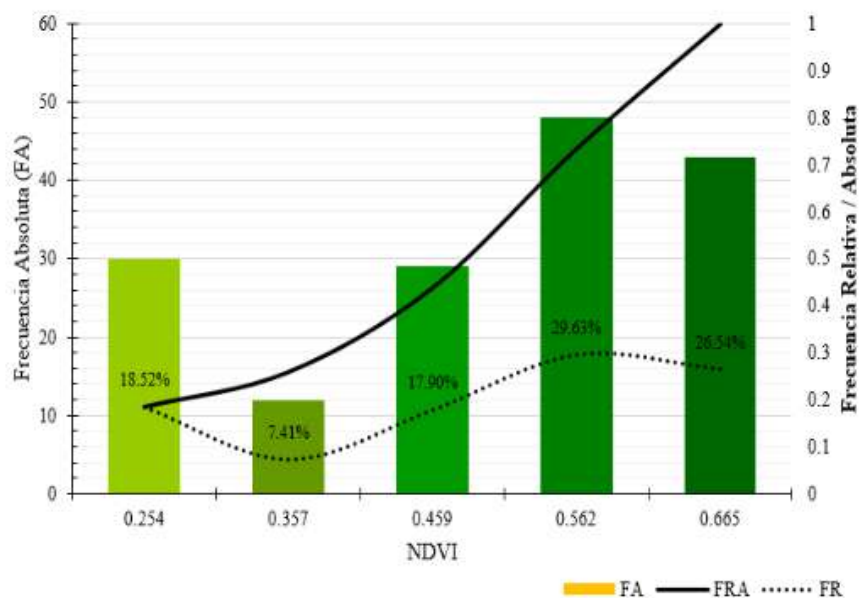


Tabla 7.

Medidas de tendencia central de los datos NDVI encontrados en el periodo de estudio

Variable	NDVI
N	162
Media	0.44
D.E.	0.16
Var(n-1)	0.02
Var(n)	0.02
E.E	0.01
CV	35.99
Min	0.15
Max.	0.67
Mediana	0.48

Los valores del EVI encontrados para los 162 puntos de trabajo estuvieron en el rango de 0.082 hasta 0.525 cuyas frecuencias y medidas de tendencia central se describen en la figura 4 y tabla 4.

Figura 4.

Gráfico de frecuencias del EVI

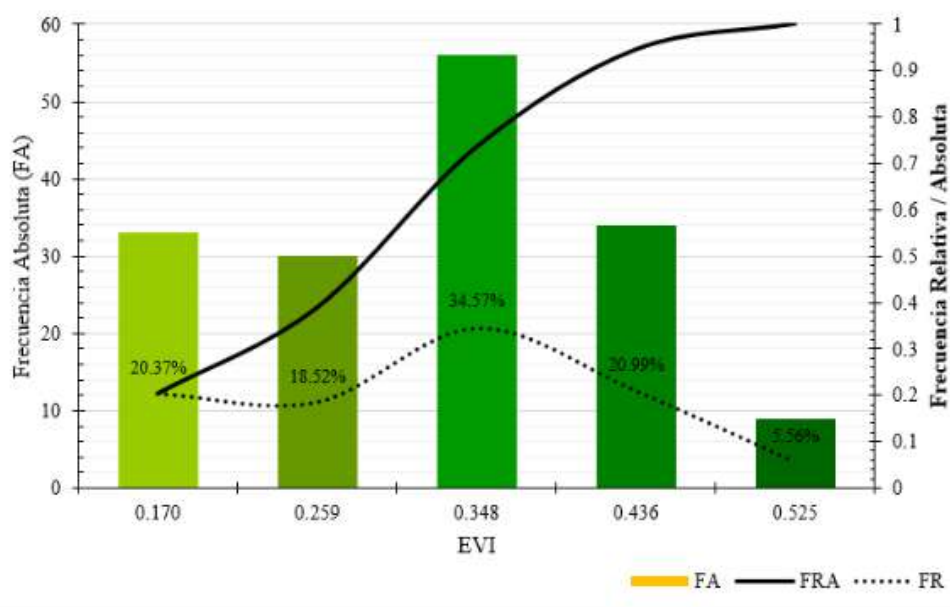


Tabla 8.

Medidas de tendencia central EVI

Variable	EVI
N	162
Media	0.27
D.E.	0.11
Var(n-1)	0.01
Var(n)	0.01
E.E	0.01
CV	41.5
Mín	0.08
Max.	0.52
Mediana	0.28

Los datos analizados tanto del NDVI y EVI el comportamiento diferente del valor EVI mostrando una mayor homogeneidad con respecto al NDVI. Situación que se manifiesta en la cercanía de los valores de

la media (0.27) y mediana (0.28), así mismo el bajo valor de la desviación estándar (DE).

El análisis de regresión tanto lineales como no lineales de las variables NDVI y EVI con los valores de CE 1:5 realizado con los modelos Dose-Response Models

(DR-Hill), modelo Sinusoidal, modelo Lineal, modelo DR-LogProbit, y el modelo DR-Weibull, dieron los resultados que se muestran a continuación.

Figura 5.

Dispersión y línea de tendencia según modelo Dose-Response Models (DR-Hill)

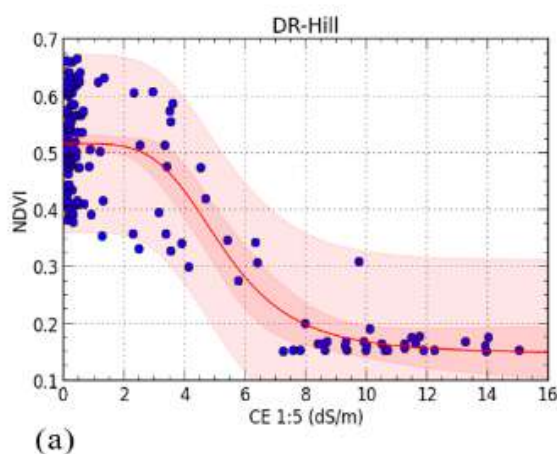
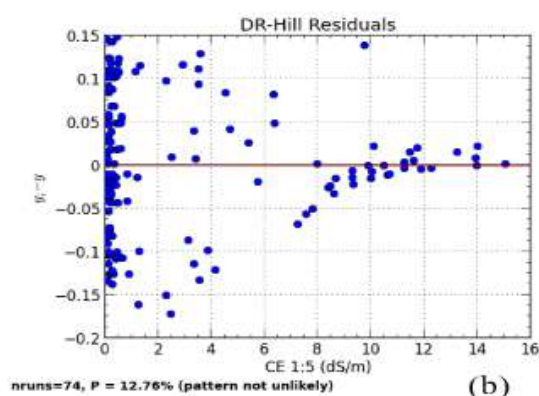


Figura 6.

Figura de valores residuales. De las variables CE_{1:5} (dS/m) y el NDVI aplicando el modelo Dose-Response Models (DR-Hill)



La ecuación aplicada fue la que se reporta en la ecuación 1

Ecuación 1.

Ecuación del modelo Dose-Response Models (DR-Hill).

$$y = \alpha + \frac{\theta x^\eta}{\kappa^\eta + x^\eta}$$

Los parámetros encontrados con la ecuación 1 se reportan en la tabla 5

Tabla 9.

Parámetros obtenidos de la correlación - Modelo DR – Hill aplicado entre las variables CE_{1:5} (dS/m) y el NDVI.

Simbolo	Valor	Std Err	Rango(95% Confianza)
Alpha (α)	0.517	0.007	0.502134 to 0.531617
Theta (θ)	-0.370	0.028	-0.424540 to -0.315005
Eta (η)	4.382	1.183	2.045377 to 6.718533
Kappa (κ)	5.269	0.452	4.376756 to 6.161046

Los resultados del análisis de regresión aplicado a los valores del EVI en función de los valores de la CE de las muestras de suelo usando el modelo Dose-Response Models (DR-Hill) fueron:

Figura 7.

Gráfico de regresión CE/EVI modelo DR-Hill. Dispersión y línea de tendencia

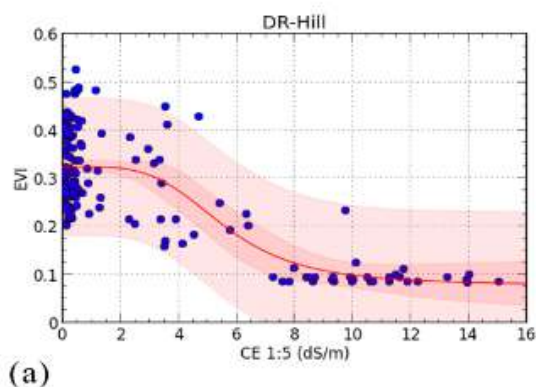
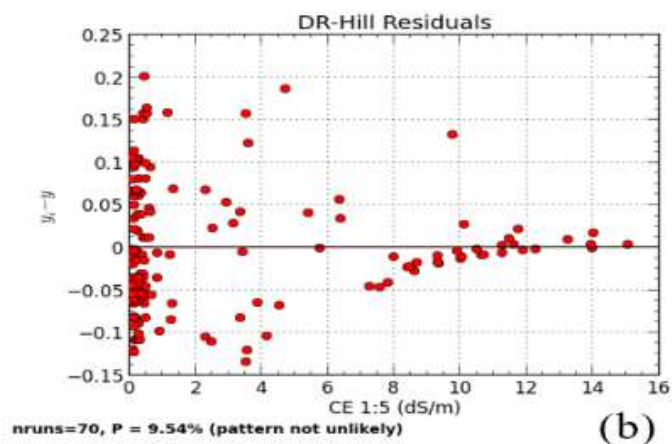


Figura 8.

Valores residuales encontrados aplicando el modelo DR-Hill a CE y EVI.



La tabla 6 muestra los parámetros de correlación que se encontraron al someter a regresión los valores EVI en función de la CE de las muestras de suelo.

Tabla 10.

Parámetros de correlación encontrados para EVI/ CE usando el modelo DR-Hill.

Símbolo	Valor	Std Err	Rango (95% Confianza)
Alpha (α)	0.324	0.007	0.310952 to 0.337903
Theta (θ)	-.246	0.030	-0.304793 to -0.188063
Eta (η)	4.095	1.525	1.081681 to 7.107339
Kappa (κ)	5.563	0.716	4.148809 to 6.976265

La aplicación de la ecuación 2 del modelo Sinusoidal para realizar la regresión entre la CE, NDVI y EVI los resultados se muestran en las figuras 9 y 10, y tablas 7 y 8.

Ecuación 2.

Ecuación del modelo Sinusoidal

$$y = a + b \cos(cx + d)$$

Figura 9.
 Dispersión y línea de tendencia usando el modelo Sinusoidal

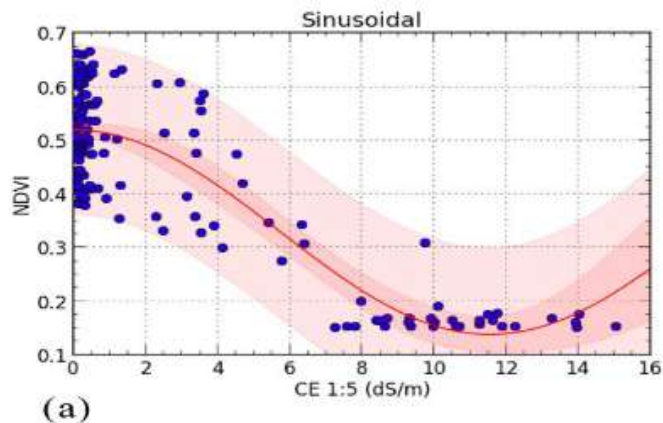


Figura 10.
 Valores residuales de la CE y los valores del EVI aplicando el modelo Sinusoidal.

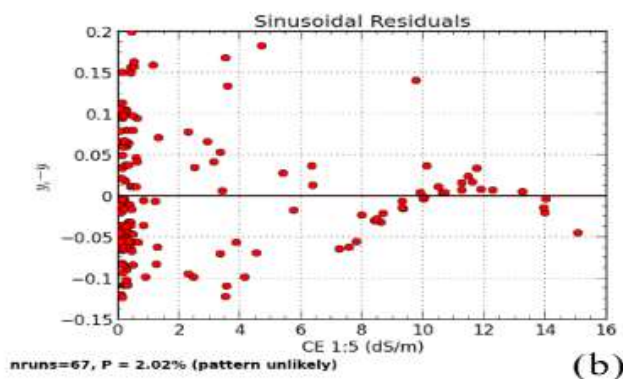


Tabla 11.
 Parámetros de correlación usando el Modelo Sinusoidal aplicado entre las variables CE_{1:5} (dS/m) y el EVI.

Simbolo	Valor	Std Err	Rango(95% Confianza)
a	0.201	0.008	0.184314 to 0.217690
b	0.124	0.008	0.107722 to 0.141093
c	0.279	0.036	0.208393 to 0.350272
d	-0.106	0.274	-0.648100 to 0.435640

Tabla 12.

Parámetros de correlación encontrados usando el Modelo lineal aplicado entre las variables $CE_{1.5}$ (dS/m) y el NDVI

Símbolo	Valor	Std Err	Rango(95% Confianza)
a	0.529	0.008	0.513072 to 0.544426
b	-0.033	0.002	-0.035813 to -0.029452

Figura 11.

Expresión gráfica de la dispersión y su línea de tendencia de los valores de $CE_{1.5}$ (dS/m) y el NDVI usando el modelo Lineal

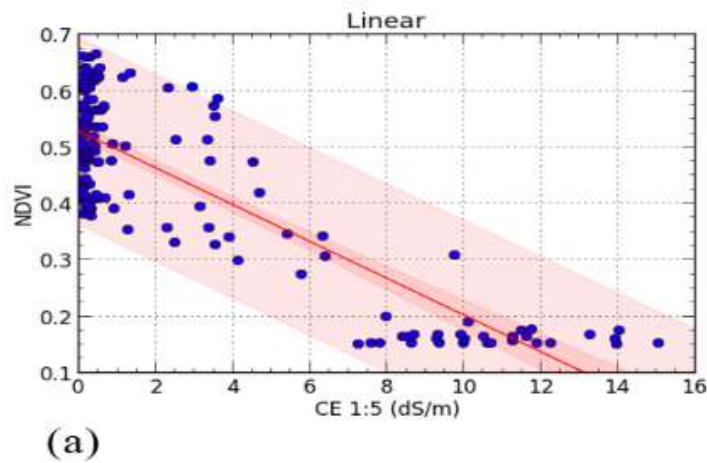
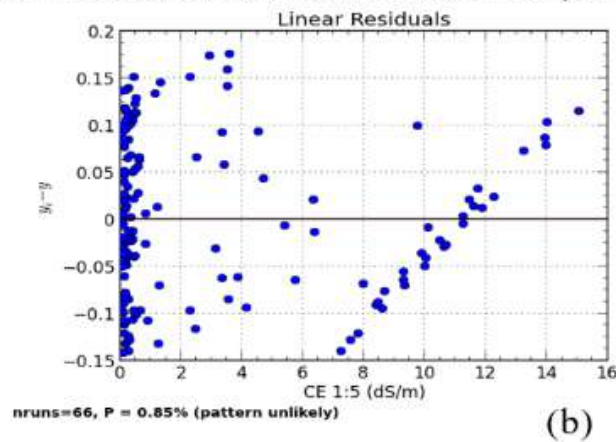


Figura 12.

Línea de tendencia para el modelo Lineal de los valores de $CE_{1.5}$ (dS/m) y el NDVI



Regresión entre la $CE_{1.5}$ (dS/m) y el EVI con el modelo Lineal

Figura 13.

Dispersión y línea de tendencia entre la CE_{1:5} (dS/m) y el EVI con el modelo Lineal

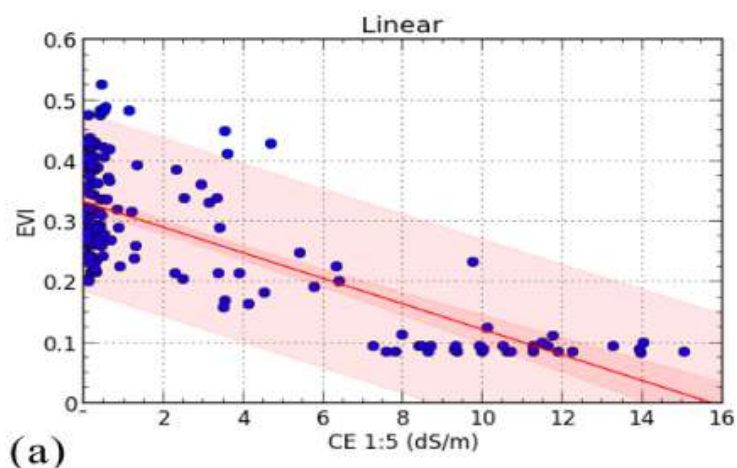


Figura 14.

Valores residuales encontrados para las variables CE_{1:5} (dS/m) y el EVI usando el modelo Lineal

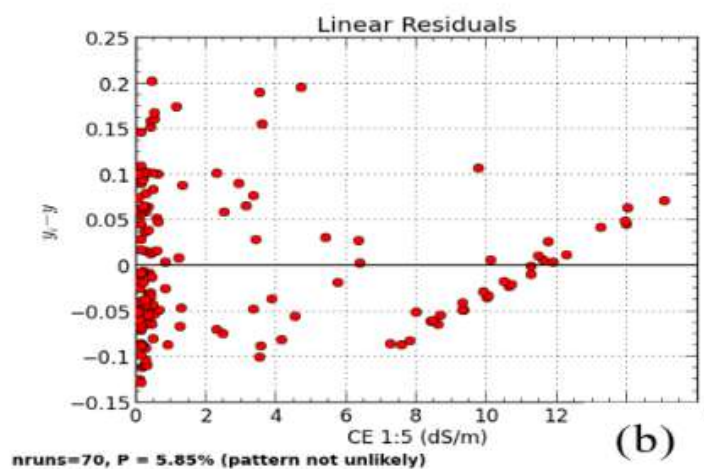


Tabla 13.

Valores de correlación usando el Modelo lineal aplicado entre las variables CE_{1:5} (dS/m) y el EVI

Símbolo	Valor	Std Err	Rango(95% Confianza)
A	0.332	0.007	0.318591 to 0.346334
B	-0.021	0.001	-0.023900 to -0.018272

Ecuación 3.

Ecuación de modelo lineal para describir la tendencia entre CE, NDVI y EVI.

$$y = a + bx$$

Análisis de regresión entre la CE_{1:5} (dS/m) NDVI y EVI con el modelo DR-LogProbit
La ecuación que describe y mide el modelo es la ecuación 4.

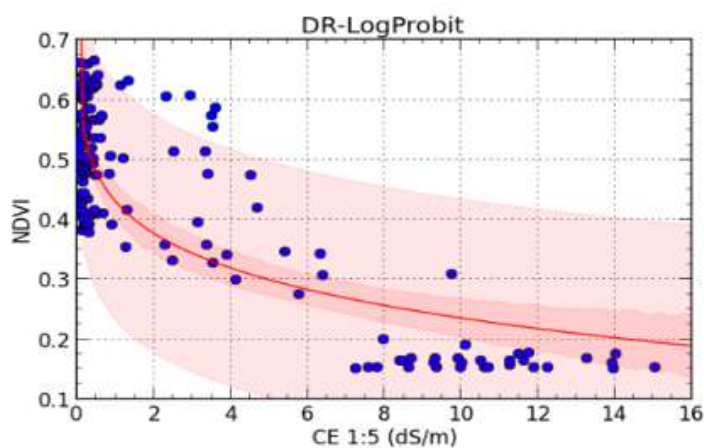
Ecuación 4.

Ecuación aplicada para el modelo DR-LogProbit.

$$y = \gamma + (1 - \gamma) \left[1 + \operatorname{erf} \left(\frac{\alpha + \beta \ln x}{\sqrt{2}} \right) \right]$$

Figura 15.

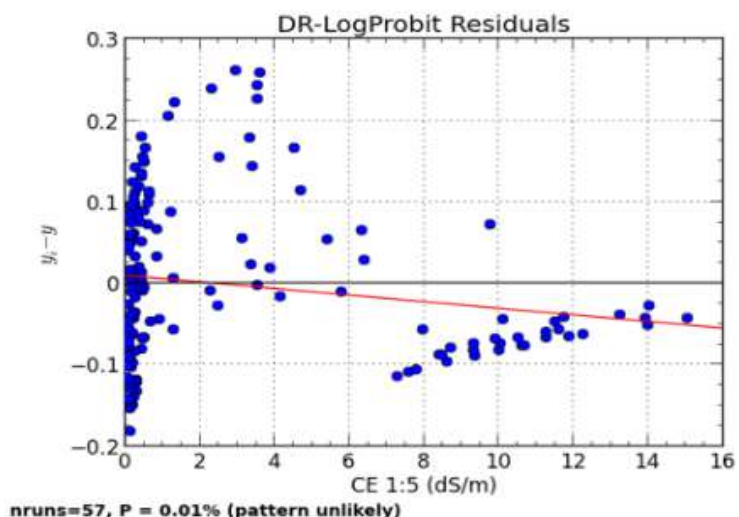
Dispersión y línea de tendencia De las variables CE_{1:5} (dS/m) y el NDVI con el modelo DR-LogProbit.



(a)

Figura 16.

Parámetros residuales. De las variables CE_{1:5} (dS/m) y el NDVI con el modelo DR-LogProbit.



(b)

Tabla 14.

Valores de correlación - Modelo DR-LogProbit aplicado entre las variables CE_{1:5} (dS/m) y el NDVI

Símbolo	Valor	Std Err	Rango(95% Confianza)
Gamma (γ)	-130.2	5365.4	-10726.984781 to 10466.4
Alpha (α)	2.624	13.929	-24.886217 to 30.134637
Beta (β)	-0.044	0.193	-0.426326 to 0.337963

Análisis de regresión entre los valores de CE_{1:5} (dS/m) y EVI usando el modelo DR-LogProbit

Tabla 15.

Valores de correlación aplicado entre las variables CE_{1:5} (dS/m) y el EVI usando el - Modelo DR-LogProbit.

Símbolo	Valor	Std Err	Rango(95% Confianza)
Gamma (γ)	-26.2	1324.4	-2642.024052 to 2589.576884
Alpha (α)	1.926	21.083	-39.712669 to 43.565625
Beta (β)	-.027	0.220	-0.461656 to 0.407223

Figura 17.

Dispersión y línea de tendencia $CE_{1:5}$ (dS/m) y EVI con el modelo DR-LogProbit

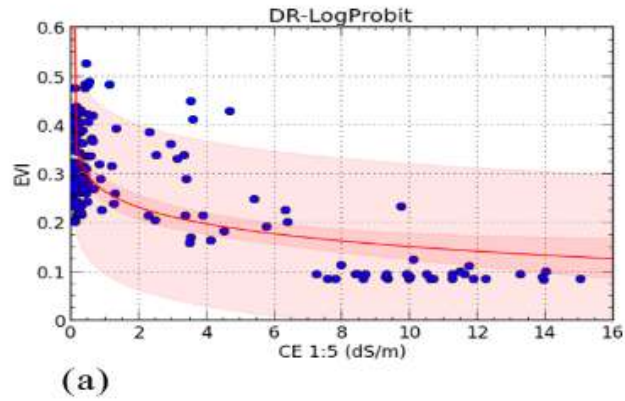
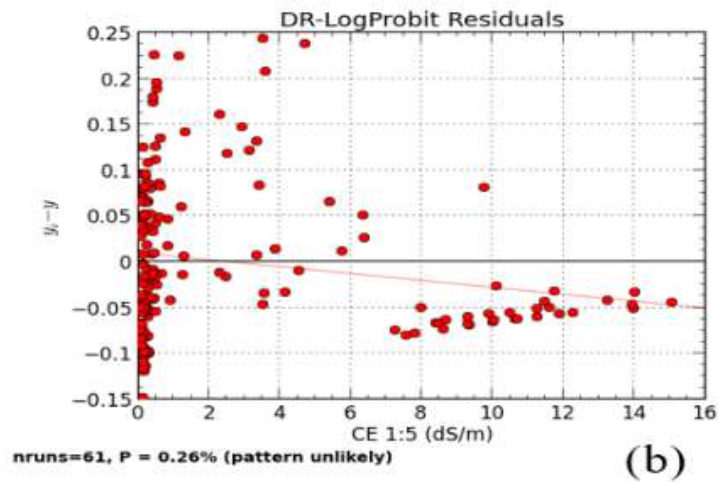


Figura 18.

Valores residuales. Variables $CE_{1:5}$ (dS/m) y EVI con el modelo DR-LogProbit.



Análisis de regresión de la $CE_{1:5}$ (dS/m) y el NDVI con el modelo DR-Weibull

Figura 19.

Dispersión y línea de tendencia de la CE_{1:5} (dS/m) y el NDVI con el modelo DR-Weibull

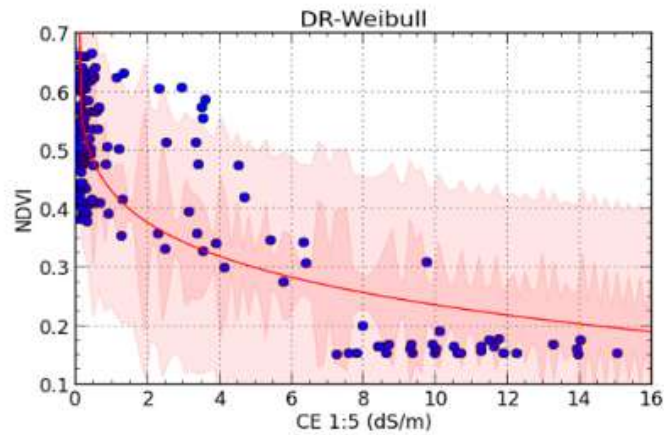


Figura 20.

Valores residuales de la CE_{1:5} (dS/m) y el NDVI con el modelo DR-Weibull.

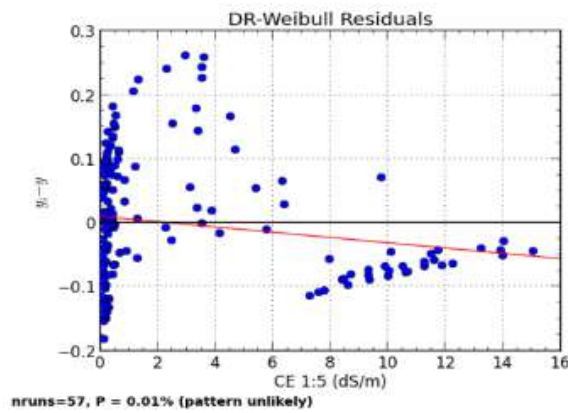


Tabla 16.

Valores de correlación - Modelo DR-Weibull aplicado entre las variables CE_{1:5} (dS/m) y el NDVI

Símbolo	Valor	Std Err	Rango (95% Confianza)
Gamma (γ)	-717.321	31523.057	-62975.238330 to 61540.597074
Alpha (α)	7.138	43.906	-79.575578 to 93.851929
Beta (β)	-0.018	0.112	-0.239782 to 0.203472

Análisis de regresión entre la CE_{1:5} (dS/m) y el EVI con el modelo DR-Weibull

Figura 21.

Dispersión y línea de tendencia. Variables $CE_{1:5}$ (dS/m) y el EVI con el modelo DR-Weibull.

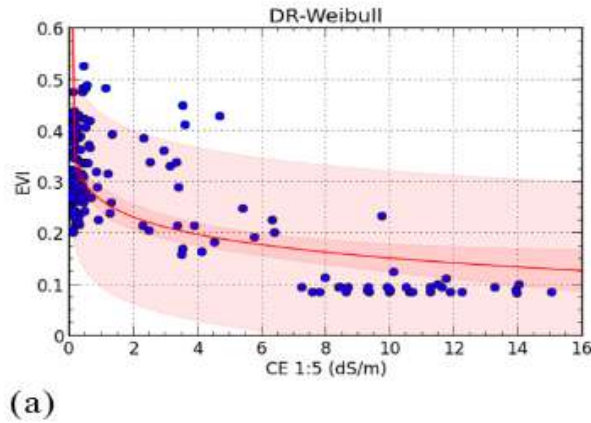


Figura 22.

Valores residuales. De las variables $CE_{1:5}$ (dS/m) y el EVI con el modelo DR-Weibull.

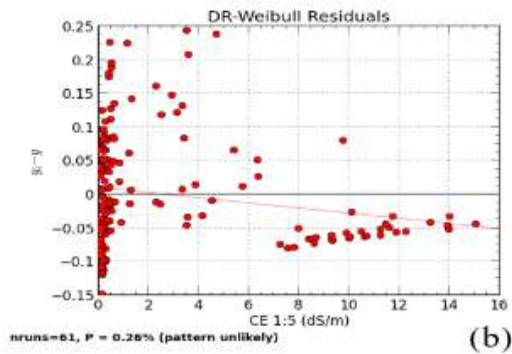


Tabla 17.

Datos de correlación - Modelo DR-Weibull aplicado entre las variables $CE_{1:5}$ (dS/m) y el EVI

Símbolo	Valor	Std Err	Rango(95% Confianza)
Gamma (γ)	-66.7	3363.8	-6710.426783 to 6576.896777
Alpha (α)	4.52	49.65	-93.545100 to 102.590478
Beta (β)	-.01	0.153	-0.315438 to 0.287700

Tabla 18.

Valores principales del Modelo DR-Weibul.

Símbolo	Valor	Std Err	Rango(95% Confianza)
Gamma (γ)	-717.	31523.057	-62975.238330 to 61540.597074
Alpha (α)	7.13	43.906	-79.575578 to 93.851929
Beta (β)	-0.01	0.112	-0.239782 to 0.203472
y	NDVI (MVC anual)		
x	CE _{1:5} (dS/m)		

Mapas de distribución espacial de la salinidad estimada con el modelo de regresión DR-Weibull

La Ecuación (9),. Fue la que se usó para elaborar los mapas de salinidad

$$y = \gamma + (1 - \gamma)(1 - e^{-\beta x^\alpha})$$

$$x = \left[\left(-\frac{1}{\beta} \right) \ln \left(\frac{1 - y}{1 - \gamma} \right) \right]^{\frac{1}{\alpha}}$$

Reemplazando los valores tenemos:

$$CE_{1:5}(dS.m^{-1}) = \left[\left(-\frac{1}{7.138} \right) \ln \left(\frac{1 - NDVI}{1 + 717.321} \right) \right]^{-0.018}$$

$$CE_{1:5}(dS.m^{-1}) = \frac{1}{\left[\left(-\frac{1}{7.138} \right) \ln \left(\frac{1 - NDVI}{1 + 717.321} \right) \right]^{\frac{1}{0.018}}}$$

Para su aplicación a los raster de MVC de NDVI la ecuación fue expresada de la siguiente manera:

$$CE_{1:5}(dS.m^{-1}) = 1 / \left(\left((-1/7.138) * \ln ((1-NDVI)) \right) ^ (1/ (1+717.3210.018)) \right)$$

Discusión

Los valores de la operacionalización de los indicadores y variables encontraron que las muestras de salinidad medidas en extracto 1:5 sus valores están comprendidos desde un mínimo 0.08

dS/m² hasta 15.07 dS/m², tal como se muestra en la tabla 2. Del total de muestras medidas su conductividad más del 50% clasifican como muestras salinas como se muestra en la figura 2. Estas mismas operacionalizaciones se realizaron para los datos NDVI y EVI. Mostrados en las

tablas 3 y 4 así como en la figuras 3 y 4. Donde se puede observar que NDVI tiene comportamiento diferente al EVI.

Los modelos de análisis de regresión dieron resultados como el caso del modelo Dose-Response Models (DR-Hill), perteneciente al grupo de modelos dosis-respuesta, (Wout, 2002). Demostró que existe relación directa entre las variables NDVI; EVI y CE1:5, con un coeficiente de correlación (r) de 0.87 que explica el grado de relación existente entre los valores de CE y valores de NDVI. Existe una relación directa y alta dependencia del NDVI. En la figura 5 se observa que cuando los valores de CE están debajo de 2 dS/m la curva forma una meseta a los valores cercano a 0.5 de NDVI.

En el caso de los valores EVI la línea de tendencia (figura 7), tiene una trayectoria similar a la del NDVI. Al ser el EVI un índice adaptado para monitorear zonas de escasa cobertura vegetal, es decir este valor puede estar influenciado por la alta heterogeneidad de los valores. En general los indicadores NDVI y EVI usando la ecuación Dose-Response Models (DR-Hill) los errores pueden deberse a factores como la presencia de plantas tolerantes a sales en los puntos de muestreo, así mismo la calidad y frecuencia de riego.

Al usar el modelo Sinusoidal para analizar la regresión de la CE y NDVI / EVI, teniendo la salinidad del suelo comportamiento toxico a medida que aumenta su concentración y el modelo Sinusoidal exige el ingreso de valores que puedan describir por completo al menos un periodo de la senoide y tal como se observa en las figuras 9 y 10. Así mismo en las figuras se muestra la trayectoria del

senoide mostrando que cubre la mitad de un periodo, lo que limita la posibilidad predictiva del modelo. Además en la figura 10 se muestra que los valores residuales se expanden a la región negativa. Por lo cual, aun teniendo un valor de coeficiente de correlación alto, al aplicar el modelo sinusoidal no se tiene certeza matemática para explicar el fenómeno de salinidad relacionado con EVI. Para aplicar este modelo se necesita mayor número de muestras que cubran como mínimo un periodo.

El modelo lineal aplicado tanto para la relación CE, NDVI y EVI muestran que la salinidad de los suelos y los índices de vegetación (NDVI, EVI) a pesar de dar coeficientes de correlación elevados. En las figuras 11, 12, 13 y 14 se puede observar que la salinidad tiene un comportamiento puramente lineal constituyendo una limitación del modelo, da entender que podría aplicarse a determinados rangos de salinidad e índices de vegetación de especies tolerantes a sales. El modelo de regresión lineal se podría aplicar en áreas de alta homogeneidad vegetal y de especies específicas. Qué no es característica del área de estudio ya que se cultivan diversidad de especies vegetales y alta heterogeneidad de CE.

El modelo DR-LogProbit aplicado (dosis – respuesta) este modelo no lineal con variable dependiente limitada arroja en ciertos casos efectos parciales es decir restringidos a una determinada región de los valores “x”.

El modelo DR-Weibull, modelo de probabilidad continua permitió establecer las probabilidades en los distintos valores de la variable CE del suelo (aleatoria)

como también manejo valores máximos o mínimos. El modelo DR-Weibull permitió manejar la variable NDVI asociada a los valores de CE del suelo. Este modelo generó valores de correlación igual a 0.78 para NDVI valor aceptable. Como se puede ver y comparar con los distintos gráficos y tablas reportadas la mejor representación del fenómeno salinidad en relación con índices de vegetación es el modelo DR_Weibull y específicamente con el NDVI. (Shi et al, 2022)

Conclusiones

Con los resultados de esta investigación podemos concluir que:

- El modelo de mayor bondad aplicado fue el modelo DR-Weibull, al tener mejor expresión probabilística en la relación salinidad NDVI. Su coeficiente r (correlación) fue igual a 0.78.
- El índice de vegetación de mayor coeficiente de correlación fue el NDVI, valores de r , mínimo de 0.78, r máximo 0.87 comparados con los valores máximos y mínimos del EVI (0.67 y 0.68).
- Del total del área agrícola evaluada (136 533 ha) se determinó que el 32.20% ocurre el proceso de salinización de los suelos pero en diferentes grados de intensidad.
- En el seguimiento temporal del periodo 2000 – 2017 se encontró que hubo periodos de ocurrencia de salinidad hasta de 75% en años extremos. De los valores anuales de máximos compuestos de índices de vegetación estudiados se observa que el NDVI es mejor aplicación que el EVI en el periodo de estudio.

Referencias

- Awad M. (1966) Las plantas en los suelos Salinos y Alcalinos. Simposio sobre Salinidad. Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas de la OEA. Dirección Regional para la Zona Andina – Programa de Zonas Áridas. Universidad Agraria, la Molina. p.1. Lima – Perú.
- Badaraco, M. Rolando R. (2012) Detección de la Salinidad en los Suelos de Cultivos de Algodón usando Imágenes de Satélite en la Costa Norte del Perú. Tesis para optar el título Profesional de Licenciado en Física. Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ciencias Físicas. Lima – Perú.
- Balzarini M.G., et al. (2008). Manual del Usuario, Editorial Brujas, Córdoba, Argentina.
- Bernardo F. T. Rudorff, Yosio E. Shimabukuro, Juan C. Ceballos (2007) O Sensor MODIS e Suas Aplicações Ambientais No Brasil. Editora Parênntese. 18 – 20, 23,24 pp. São José dos Campos – São Paulo – Brasil.
- Bo Holmberg, Johan Höggberg y Gunnar Johanson (1998) Enciclopedia de salud y seguridad en el trabajo / Cap. 33 – Toxicología. Oficina Internacional del Trabajo. Madrid – España. Recuperado el 12 de diciembre del 2018. De <https://goo.gl/GwkWEq>
- Bornemisza, E. y Hans W. Fassbender (1993). Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina. Dirección de Información, Comunicación, Capacitación y Asuntos Institucionales (DICCAI).

- Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA). 2da. Edición. p.187. San José, Costa Rica.
- Castro, J.C., Balderas, M.A. & Hernandez, M., 2010. Identificación de Húmedad en el suelo a través de la teledetección para el mejor manejo de la tierra: caso zona florícola, Estado de México. Facultad de Geografía, Ciudad Universitaria, pp.2349–2351.
- Chuvieco, E., 1995. Fundamentos De Teledetección Espacial. , p.449.
- Córdova, N. Rodil L. (2010) Estimación de la salinidad del suelo de los fundos Chacra Vieja y el Ciénago de la Universidad Nacional Pedro Ruíz Gallo Facultad de Agronomía (Lambayeque) usando imágenes de satélite. Tesis para optar el título profesional de Ingeniero Agrónomo. Universidad Nacional Pedro Ruíz Gallo. Facultad de Agronomía. Lambayeque – Perú.
- Di Rienzo J.A., et al (2008). InfoStat, versión 2008, Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- FAO (2000) Manual de Prácticas Integradas de Manejo y Conservación de Suelos. Boletín de Tierras y Aguas de la FAO. p.7. Roma.
- Flores, R.S. et al., 2016. Identificación de las tierras degradadas por la salinidad del suelo en los cultivos de caña de azúcar mediante imágenes de satélite. Revista de Investigación de Física, 19, pp.0–9.
- François M. Jean (2011). Aplicaciones del sensor MODIS para el monitoreo del territorio. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), Instituto Nacional de Ecología (INE), Universidad Autónoma de México (UNAM), Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental (CIGA). Primera Edición. México.
- García M. Mariela. (2008) Salinidad en el valle Chancay. Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo. Chiclayo – Perú. Recuperado de: <http://www.slideshare.net/meylingm/salinidad-del-valle-chancay-lambayeque-presentation-743578>
- García-Mora, T. Mas, J.F. (2011). Evaluación de imágenes del sensor MODIS para la cartografía de la cobertura del suelo en una región altamente diversa de México. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana 63(1), 83-94
- Gonzales, et al. (1986) Clasificación de Imágenes a partir de índices de vegetación. Aplicación en una zona piloto de la comunidad Autónoma de Cantabria. Comunicaciones de la I Reunión Científica de Grupo de Trabajo de Teledetección. Institut d'Investigacions Geològiques Jaume Almera (C.S.I.C) pp. 251 – 269. Barcelona – España. Recuperado el 27 de setiembre del 2012 de: http://www.aet.org.es/congresos/i_bar0014.pdf
- IGN, 2009. ¿Qué es la teledetección?, Available at: <http://pnt.ign.es/> [Accessed July 31, 2018].
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi, I., 2007. Capítulo 3: Teledetección. In Mejora de los Sistemas de Cartografía del Territorio Colombiano. Available at: <ftp://ftp.ciat.cgiar.org/DAPA/plani>

- ficacion/GEOMATICA/Teledeteccion/Teledeteccion_Modulo.pdf [Accessed August 1, 2018].
- Lazara Otero; et al. (2007) Caracterización y Evaluación de la Salinidad. Instituto de Suelos. Ministerio de Agricultura – La Habana – Cuba. Recuperado el 04 de Diciembre del 2012, de <http://www.fao.org/docs/eims/upload/cuba/5420/salinidad.pdf>
- Moya T., J.A. (2009). Riego Localizado y Fertirrigación. Ediciones Mundi-Prensa. 4a Edición. p.55. Madrid – España. Recuperado de: <http://books.google.com.pe/books?id=Xou2D2WupYkC&printsec=frontcover&hl=es#v=onepage&q&f=false>
- Núñez S., J. (2000) Fundamentos de Edafología. 3ra. reimp. 2da. Edición. Editorial EUNED (Editorial Universidad Estatal a Distancia) p. 102. San José – Costa Rica.
- Parra M. A.; R. Fernández – Escobar; C. Navarro y Otros. (2002). Los Suelos y La Fertilización del Olivar Cultivado en Zonas Calcáreas. Ediciones Mundi-Prensa. Junta de Andalucía, Consejería de Agricultura y Pesca. p.57. Madrid, España.
- Pérez G., Carlos y Muñoz N., A. Luís. (2006) Teledetección Nociones y Aplicaciones. 3a Edición. p.1. Avila – España.
- Pérez, C. y Muñoz, A. (Eds) (2006) Teledetección Nociones y Aplicaciones. Universidad de Salamanca. Avila, España.
- Pérez, D. (2007). Introducción a los Sensores Remotos-Aplicaciones en Geología. Laboratorio de Tectónica Andina, Universidad de Buenos Argentina. (UBA).
- Porta, J.; López-Acevedo, M. y Roquero, C.: (2003) Edafología para la agricultura y el medio ambiente. 3.ª Edición. Ediciones Mundi-Prensa, 960 pp. Madrid. pág. 96,291, 292, 732y733.
- Pullido M. Leonardorl, et all. (1996) La Importancia de Conservar los recursos suelo y agua para los módulos de riego. Memorias II seminario internacional “Transferencia de de los sistemas de riego”. 267 – 273. pp. Guanajuato – Mexico.
- Ramos Jennifer. The Notable Trees of Villanova University. Department of Geography and the Environment – VILLANOVA UNIVERSITY. Recuperado el 09 de enero del 2013, de: <http://www47.homepage.villanova.edu/guillaume.turcotte/studentprojects/arboretum/NDVI.htm>
- Richards, L.A. (1985). Diagnóstico Y Rehabilitación De Suelos Salinos Y Sódicos. Departamento de Agricultura De los Estados Unidos de América (USDA). Laboratorio de Salinidad. Editorial Limusa.p.3. México.
- Rodríguez, O. Arredondo, H. (2005). Manual para el Manejo y Procesamiento de Imágenes Satelitales Obtenidas del Sensor MODIS de la NASA Aplicándolo a Estudios de Ingeniería Civil. Pontificia Universidad Javeriana, Facultad de Ingeniería Civil, Bogotá. Colombia.
- Samarakoo, L., 1991. Introduction to Remote Sensing Introduction to Remote Sensing, Available at: http://www.isprs.org/caravan/documents/Lao_Basic_RS.pdf

- [Accessed July 31, 2018].
- Silva, A. (2014). Analysis of vegetation dynamics using time-series vegetation index data from Earth Observation Satellites. (Tese de Doutorado). Faculdade de Ciências da Universidade do Porto. Brasil.
- USGS, What is remote sensing and what is it used for? Available at: https://www.usgs.gov/faqs/what-remote-sensing-and-what-it-used?qt-news_science_products=7#qt-news_science_products [Accessed July 31, 2018].
- Vásquez, R. (2000) Influencia de la salinidad sobre el suelo, Editorial Agrícola Española, S.A. Madrid – España.
- Wiegand, et all. (1992 a y 1992b) Citado por Pullido M. Leonardorl , et all. (1996) La Importancia de Conservar los recursos suelo y agua para los módulos de riego. Memorias II seminario internacional “Transferencia de de los sistemas de riego”. 267 – 273. pp. Guanajuato – Mexico.
- Wild Alan (1989). Condiciones del Suelo y Desarrollo de las Plantas Según Russell. Ediciones Mundi-Prensa. p.972. Madrid, España.