



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO

INSTITUTO INTERAMERICANO DE TECNOLOGÍA Y CIENCIAS DEL AGUA
(IITCA)

TESIS

Título

**ESTIMACIÓN Y VALIDACIÓN DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN REAL PARA
MATORRAL XERÓFILO MEDIANTE TELEDETECCIÓN**

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS DEL AGUA

PRESENTA:

Lic. ANDY MEJÍA OLIVAREZ

TUTOR ACADÉMICO:

Dr. CARLOS ALBERTO MASTACHI LOZA

TUTOR ADJUNTO:

Dr. ENRIQUE GONZÁLEZ SOSA

DICIEMBRE 2020

RESUMEN

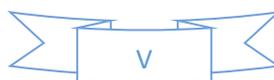
La evapotranspiración (ET) es el componente del ciclo hidrológico más difícil de estimar debido a sus complejas interacciones en el sistema suelo-planta-atmósfera, pero asimismo es clave en la dinámica y gestión de los recursos hídricos. El presente trabajo tiene como objetivo integrar, validar y automatizar una metodología para estimar *ET* para matorral xerófilo, mediante datos meteorológicos y teledetección. Este estudio se enfocó en el ecosistema semiárido del Altiplano central, considerando los registros de flujos turbulentos (Eddy covariance) de la estación Bernal. La metodología para estimar Evapotranspiración real se basa en datos meteorológicos y datos satelitales (espectro visible, infrarrojo cercano y térmico), a partir de la estimación de los componentes: Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (*NDVI*), albedo (α), temperatura de superficie (*T_s*) y radiación neta (*R_n*). Para implementar y validar la metodología se adquirieron 14 escenas del satélite Landsat 8 (path=27 y row=46) para los años 2017(6) y 2018(8). Los componentes *T_s*, *R_n* y *ET* estimados a la hora de paso del satélite se contrastaron con los valores registrados de la estación Bernal de forma puntual (pixel donde se encuentra la estación; 900 m²) y en una malla de 3X3 pixeles (área circundante a la estación). Los resultados indican que la metodología presenta un RMSE de 0.42 mm día⁻¹ y NSE de 0.82. Se implementó un Módulo para la automatización, mismo que se desarrolló en Terrset, el cual se denominó **TMFREE** (**T**errSet **M**odule **F**o**R** **E**vapotranspiration **E**stimation through Landsat 8 images).

El módulo TMFREE no sólo permite obtener de forma automatizada la estimación de la evapotranspiración, también permite obtener el NDVI, el albedo de superficie, la temperatura de superficie y la radiación neta. Estas variables pueden ser utilizadas para estudios de distinta índole como evaluación de islas de calor, desarrollo y seguimiento fenológico de cultivos, gestión y planeación urbana, meteorología, agricultura, recursos hídricos, estudio de la variabilidad de cambio climático.

ABSTRACT

Evapotranspiration (ET) is the most difficult component of the hydrological cycle to estimate because of its complex interactions in the soil-plant-atmosphere system, but it is also key in the dynamics and management of water resources. The present work has as objective to integrate, validate and automate a methodology to estimate ET for xerophytic scrub, using meteorological data and remote sensing. This study was focused on the semi-arid ecosystem of the central Altiplano, considering the records of turbulent flows (Eddy covariance) of Bernal station. The methodology to estimate Evapotranspiration is based on meteorological data and satellite data (visible, near infrared and thermal spectrum), from the estimation of the components: Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), albedo (α), surface temperature (T_s) and net radiation (R_n). To implement and validate the methodology, 14 scenes were acquired from the Landsat 8 satellite (path=27 and row=46) for the years 2017(6) and 2018(8). The T_s , R_n and ET components estimated at the time of the satellite passage were contrasted with the values recorded from the Bernal station in a punctual way (pixel where the station is located; 900 m²) and in a 3X3 pixel grid (area surrounding the station). The results indicate that the methodology presents an estimation error of 0.42 mm day⁻¹. A Module was implemented for automation, which was developed at Terrset and was called **TMFREE** (**T**errSet **M**odule **F**oR **E**vapotranspiration **E**stimation through Landsat 8 images).

The TMFREE module not only allows to obtain in an automated way the estimation of the evapotranspiration, also allows to obtain the NDVI, the surface albedo, the temperature surface and net radiation. These variables can be used for studies of such as heat island assessment, development and phenological monitoring of crops, urban management and planning, meteorology, agriculture, water resources, study of climate change variability.



ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	II
DEDICATORIA	III
RESUMEN.....	IV
ABSTRACT.....	V
ÍNDICE DE TABLAS	IX
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XI
ÍNDICE DE ECUACIONES.....	XIII
ACRÓNIMOS.....	XIV
NOMENCLATURA Y UNIDADES	XVII
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Antecedentes	2
1.2. Justificación.....	4
1.3. Hipótesis.....	6
1.4. Objetivos	6
1.4.1. General	6
1.4.2. Específicos	6
2. MARCO TEÓRICO	7
2.1. Zonas semiáridas.....	7
2.2. Matorral Xerófilo	7
2.3. Evapotranspiración.....	8
2.3.1. Evaporación.....	9
2.3.2. Transpiración.....	9
2.4. Factores que influyen en la evapotranspiración	10
2.4.1. Factores climáticos.....	10
2.4.2. Factores de cultivo	11
2.4.3. Factores ambientales y manejo.....	11
2.5. Métodos para medir la evapotranspiración	11
2.5.1. Método directo	11
2.5.2. Método indirecto	16
2.6. Teledetección	20
2.6.1. Aplicaciones de la teledetección	21
2.6.2. Satélites	22

2.6.3	Sensores.....	24
2.6.4	Espectro electromagnético	25
2.6.5	Mecanismo para la obtención de datos de satélite.....	27
2.6.6	Landsat	28
3	METODOLOGÍA	32
3.1	Área de estudio.....	34
3.2	Base de datos satelital	41
3.3	Base de datos Eddy covariance	42
3.4	Estimación de Evapotranspiración (ET).....	44
3.4.1	Pre-procesamiento	45
3.4.1.1	Radiancia espectral (L_{λ})	46
3.4.1.2	Reflectancia espectral TOA (ρ_{λ}).....	47
3.4.1.3	Corrección Atmosférica	48
3.4.1.4	Calidad de datos de la imagen.....	49
3.5	Radiación neta (R_n).....	50
3.5.1	Albedo de superficie (α).....	52
3.5.1.1	Albedo ajustado por la transmisividad atmosférica (α_{toa})	53
3.5.1.2	Proporción promedio de radiación solar entrante ($\alpha_{path_radiance}$).....	54
3.5.1.3	Transmisividad atmosférica (τ_{oc}).....	54
3.5.2	Radiación de onda corta entrante ($R_s \downarrow$)	56
3.5.2.1	Distancia relativa Tierra-Sol (d_r).....	57
3.5.3	Radiación de onda larga entrante ($R_L \downarrow$)	59
3.5.3.1	Emisividad atmosférica (ϵ_a)	60
3.5.4	Radiación de onda larga saliente ($R_L \uparrow$)	61
3.5.4.1	Emisividad de superficie (ϵ_0)	62
3.5.4.2	Temperatura de superficie (T_s)	64
3.6	Validación	72
3.7	Metodología automatizada	73
3.7.1	Tablas de entrada y salida de datos	75
4	RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	80
4.1	Estimación de los componentes para la estimación de la Evapotranspiración.....	80
4.1.1	Gráfica NDVI estimado por metodología	80
4.1.2	Gráfica albedo estimado por metodología.....	82

4.1.3	Temperatura de superficie (Ts) observada vs estimada	83
4.1.4	Radiación neta (Rn) observada vs estimada.....	84
4.1.5	Evapotranspiración (ET) observada vs estimada	86
4.2	Validación	87
4.3	Automatización	91
4.4	Mapas distribución de componentes (Porción de Querétaro).....	101
4.4.1	Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)	101
4.4.2	Albedo de superficie.....	103
4.4.3	Temperatura de superficie	104
4.4.4	Radiación neta	105
4.4.5	Evapotranspiración.....	106
5	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	109
6	BIBLIOGRAFÍA.....	111
7	ANEXOS	116
7.1	Tablas comparativas para validación	116
7.1.1	Temperatura de superficie (Ts) °C para el año 2017.....	116
7.1.2	Radiación neta (Rn) W m ⁻² para el año 2017	118
7.1.3	Evapotranspiración (ET) para el año 2017.....	119
7.1.4	Temperatura de superficie (Ts) °C para el año 2018.....	120
7.1.5	Radiación neta (Rn) W m ⁻² , para el año 2018	122
7.1.6	Evapotranspiración (ET) para el año 2018.....	125
7.2	Manual de usuario TMFREE	127
7.2.1	Requerimientos.....	129
7.2.2	Interfaz del programa	132

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 2.1 EJEMPLOS DE SATÉLITES UTILIZADOS EN PERCEPCIÓN REMOTA Y TIPO DE SENSOR.....	23
TABLA 2.2 HISTORIAL MISIONES LANDSAT	29
TABLA 2.3 SENSOR OPERATIONAL LAND IMAGER (OLI)	30
TABLA 2.4 SENSOR THERMAL INFRARED SENSOR (TIRS).....	31
TABLA 3.1 FICHA TÉCNICA DE ESTACIÓN DE FLUJOS TURBULENTOS	36
TABLA 3.2 IMPORTANCIA DE LOS CLIMAS DE LA ZONA DE ESTUDIO CON BASE EN SUPERFICIE QUE ABARCA	40
TABLA 3.3. FECHA DE IMÁGENES LANDSAT 8 DISPONIBLES PARA LA ZONA DE ESTUDIO (PATH 27 Y ROW 46).....	42
TABLA 3.4 BASE DE DATOS METEOROLÓGICOS CORRESPONDIENTES A LAS FECHAS DE IMÁGENES DE SATÉLITE.....	43
TABLA 3.5 BASE DE DATOS DE LOS PRINCIPALES PARÁMETROS DE LA ESTACIÓN BERNAL.....	43
TABLA 3.6 COEFICIENTES PARA EL CÁLCULO DE EVAPOTRANSPIRACIÓN	45
TABLA 3.7 RECLASIFICACIÓN PARA CORRECCIÓN ATMOSFÉRICA, BANDA BQA CON VALOR 0.....	50
TABLA 3.8 RECLASIFICACIÓN PARA CORRECCIÓN ATMOSFÉRICA, BANDA BQA CON VALOR -9999	50
TABLA 3.9 PESO PARA OBTENER MEDIA DE ALBEDO	54
TABLA 3.10 DÍA CORRESPONDIENTE A DÍA JULIANO.....	58
TABLA 3.11 CONTINUACIÓN DÍA CORRESPONDIENTE A DÍA JULIANO (DOY)	59
TABLA 3.12 RECLASIFICACIÓN SAVI ≤ 0.817	63
TABLA 3.13 RECLASIFICACIÓN SAVI > 0.817	64
TABLA 3.14 COEFICIENTES METODOLOGÍA SPLIT WINDOWS	65
TABLA 3.15 DENSIDAD DEL AIRE (A) Y RELACIÓN DE MEZCLA DE SATURACIÓN (E) DE VAPOR DE AGUA A AIRE PARA VARIAS TEMPERATURAS DEL AIRE (T), (F. WANG ET AL., 2015).	66
TABLA 3.16 RECLASIFICACIÓN PARA NDVIa.....	67
TABLA 3.17 RECLASIFICACIÓN PARA NDVIv.....	68
TABLA 3.18 RECLASIFICACIÓN PARA NDVIS	68
TABLA 3.19 RECLASIFICACIÓN PARA NDVIMIX	68
TABLA 3.20 ENTRADA Y SALIDA DE DATOS PARA LA ENTRADA DE DATOS	75
TABLA 3.21 ENTRADA Y SALIDA DE DATOS PARA ESTIMACIÓN DE ÍNDICES DE VEGETACIÓN.....	75
TABLA 3.22 ENTRADA Y SALIDA DE DATOS PARA LA ESTIMACIÓN DE RADIACIÓN DE ONDA CORTA ENTRANTE ($R_s \downarrow$)	76
TABLA 3.23 ENTRADA Y SALIDA DE DATOS PARA LA ESTIMACIÓN DE ALBEDO DE SUPERFICIE (A).....	76
TABLA 3.24 ENTRADA Y SALIDA DE DATOS PARA LA ESTIMACIÓN DE TEMPERATURA DE SUPERFICIE (T_s)	77
TABLA 3.25 ENTRADA Y SALIDA DE DATOS PARA LA ESTIMACIÓN DE RADIACIÓN DE ONDA LARGA SALIENTE ($R_L \uparrow$).....	77
TABLA 3.26 ENTRADA Y SALIDA DE DATOS PARA LA ESTIMACIÓN DE RADIACIÓN DE ONDA LARGA ENTRANTE ($R_L \downarrow$)	78
TABLA 3.27 ENTRADA Y SALIDA DE DATOS PARA LA ESTIMACIÓN DE RADIACIÓN NETA (R_n)	78
TABLA 3.28 ENTRADA Y SALIDA DE DATOS PARA LA ESTIMACIÓN DE EVAPOTRANSPIRACIÓN (ET).....	79
TABLA 4.1 VALORES ESTADÍSTICOS DE NDVI PARA VALORES ESTIMADOS.....	82
TABLA 4.2 VALORES ESTADÍSTICOS DE ALBEDO (A) PARA VALORES ESTIMADOS.....	83
TABLA 4.3 VALORES ESTADÍSTICOS DE TEMPERATURA DE SUPERFICIE (T_s) PARA VALORES OBSERVADOS VS ESTIMADOS	84
TABLA 4.4 VALORES ESTADÍSTICOS DE RADIACIÓN NETA (R_n) PARA VALORES OBSERVADOS VS ESTIMADOS	85
TABLA 4.5 VALORES ESTADÍSTICOS DE EVAPOTRANSPIRACIÓN (ET) PARA VALORES OBSERVADOS VS ESTIMADOS	87
TABLA 4.6 CRITERIOS DE EFICIENCIA (WASEEM ET AL., 2017)	89
TABLA 4.7 VALOR DEL NDVI CORRESPONDIENTE A LA FECHA 04 DE ABRIL DEL 2017	102
TABLA 4.8 VALOR DE ALBEDO DE SUPERFICIE α CORRESPONDIENTE A LA FECHA 04 DE ABRIL DEL 2017	103
TABLA 4.9 VALOR DE TEMPERATURA DE SUPERFICIE T_s CORRESPONDIENTE A LA FECHA 04 DE ABRIL DEL 2017.....	105
TABLA 4.10 VALOR DE RADIACIÓN NETA R_n CORRESPONDIENTE A LA FECHA 29 DE OCTUBRE DE 2017	106
TABLA 4.11 VALOR DE EVAPOTRANSPIRACIÓN ET CORRESPONDIENTE A LA FECHA 29 DE OCTUBRE DE 2017.....	107
TABLA 7.1 VALIDACIÓN 04-ABRIL-2017, (T_s) °C.....	116
TABLA 7.2 VALIDACIÓN 20-ABRIL-2017, (T_s) °C.....	116
TABLA 7.3 VALIDACIÓN 06-MAYO-2017, (T_s) °C.....	116
TABLA 7.4 VALIDACIÓN 22-MAYO-2017, (T_s) °C.....	117

TABLA 7.5 VALIDACIÓN 29-OCTUBRE-2017, (Ts) °C.....	117
TABLA 7.6 VALIDACIÓN 30-NOVIEMBRE-2017, (Ts) °C.....	117
TABLA 7.7 VALIDACIÓN 22-MAYO-2017, (Rn) W M ⁻²	118
TABLA 7.8 VALIDACIÓN 29-OCTUBRE-2017, (Rn) W M ⁻²	118
TABLA 7.9 VALIDACIÓN 30-NOVIEMBRE-2017, (Rn) W M ⁻²	118
TABLA 7.10 VALIDACIÓN 22-MAYO-2017, (ET) MM-DÍA ⁻¹	119
TABLA 7.11 VALIDACIÓN 29-OCTUBRE-2017, (ET) MM-DÍA ⁻¹	119
TABLA 7.12 VALIDACIÓN 30-NOVIEMBRE-2017, (ET) MM-DÍA ⁻¹	119
TABLA 7.13 VALIDACIÓN 17-ENERO-2018, (Ts) °C.....	120
TABLA 7.14 VALIDACIÓN 02-FEBRERO-2018, (Ts) K.....	120
TABLA 7.15 VALIDACIÓN 18-FEBRERO-2018, (Ts) °C.....	120
TABLA 7.16 VALIDACIÓN 22-MARZO-2018, (Ts) °C.....	121
TABLA 7.17 VALIDACIÓN 23-ABRIL-2018, (Ts) °C.....	121
TABLA 7.18 VALIDACIÓN 09-MAYO-2018, (Ts) °C.....	121
TABLA 7.19 VALIDACIÓN 25-MAYO-2018, (Ts) °C.....	122
TABLA 7.20 VALIDACIÓN 17-ENERO-2018, (Rn) W M ⁻²	122
TABLA 7.21 VALIDACIÓN 02-FEBRERO-2018, (Rn) W M ⁻²	122
TABLA 7.22 VALIDACIÓN 18-FEBRERO-2018, (Rn) W M ⁻²	123
TABLA 7.23 VALIDACIÓN 22-MARZO-2018, (Rn) W M ⁻²	123
TABLA 7.24 VALIDACIÓN 07-ABRIL-2018, (Rn) W M ⁻²	123
TABLA 7.25 VALIDACIÓN 23-ABRIL-2018, (Rn) W M ⁻²	124
TABLA 7.26 VALIDACIÓN 09-MAYO-2018, (Rn) W M ⁻²	124
TABLA 7.27 VALIDACIÓN 25-MAYO-2018, (Rn) W M ⁻²	124
TABLA 7.28 VALIDACIÓN 17-ENERO-2018, (ET) MM DÍA ⁻¹	125
TABLA 7.29 VALIDACIÓN 02-FEBRERO-2018, (ET) MM DÍA ⁻¹	125
TABLA 7.30 VALIDACIÓN 18-FEBRERO-2018, (ET) MM DÍA ⁻¹	125
TABLA 7.31 VALIDACIÓN 22-MARZO-2018, (ET) MM DÍA ⁻¹	126
TABLA 7.32 VALIDACIÓN 07-ABRIL-2018, (ET) MM DÍA ⁻¹	126
TABLA 7.33 VALIDACIÓN 23-ABRIL-2018, (ET) MM DÍA ⁻¹	126
TABLA 7.34 VALIDACIÓN 09-MAYO-2018, (ET) MM DÍA ⁻¹	127
TABLA 7.35 VALIDACIÓN 25-MAYO-2018, (ET) MM DÍA ⁻¹	127
TABLA 7.36 FUNCIONES DE LA BARRA DE MENÚ.....	131



ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 2.1 LISÍMETRO (SAN ROMÁN, 2004).....	13
FIGURA 2.2 TANQUE EVAPORÍMETRO (SAN ROMÁN, 2004).....	14
FIGURA 2.3 FITÓMETRO (LLAMAS, 1993)	15
FIGURA 2.4 FLUJO DE ENERGÍA	20
FIGURA 2.5 TIPOS DE ÓRBITAS SATELITALES (MANRIQUEZ, 2018).....	24
FIGURA 2.6 ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO (SANJURJO & KALLIOLA, 2004).....	27
FIGURA 2.7 MECANISMOS PARA OBTENCIÓN DE DATOS DE SATÉLITE.....	28
FIGURA 2.8 HISTORIA SATELITES LANDSAT	29
FIGURA 3.1 ESTIMACIÓN Y VALIDACIÓN DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN PARA MATORRAL XERÓFILO MEDIANTE TELEDETECCIÓN	33
FIGURA 3.2 LOCALIZACIÓN DE LOS SITIOS MexFLUX EN MÉXICO PARA MONITOREO DE FLUJOS DE CO ₂ Y ENERGÍA (ESTACIONES FLUJOS TURBULENTOS).....	35
FIGURA 3.3 INSTALACIÓN DE ESTACIÓN BERNAL	36
FIGURA 3.4 ESTACIÓN BERNAL EN OPERACIÓN.....	36
FIGURA 3.5 INSTRUMENTACIÓN DE TRES PLACAS PARA MEDIR FLUJO DE CALOR EN EL SUELO (SUELO DESNUDO, CUBIERTO Y SEMICUBIERTO)	36
FIGURA 3.6 UBICACIÓN ESTACIÓN BERNAL.....	37
FIGURA 3.7 UBICACIÓN MUNICIPIOS DEL ESTADO DE QUERÉTARO.....	38
FIGURA 3.8 ÁREA DE ESTUDIO: LOCALIZACIÓN DE ESTACIÓN BERNAL Y COBERTURA DE IMAGEN LANDSAT 8	39
FIGURA 3.9 CLIMAS DE LA ZONA DE ESTUDIO	40
FIGURA 3.10 VEGETACIÓN POTENCIAL DE LA ZONA DE ESTUDIO (RZEDOWSKI, 1990).....	41
FIGURA 3.11 DIAGRAMA PARA OBTENER EL PRE-PROCESAMIENTO DE DATOS	46
FIGURA 3.12 DATOS DE ENTRADA CON SELECCIÓN DE CONVERSIÓN A REALIZAR	49
FIGURA 3.13 DIAGRAMA PARA CÁLCULO DE R _n Y SUS COMPONENTES	51
FIGURA 3.14 DIAGRAMA CÁLCULO DE ALBEDO (A) Y SUS COMPONENTES.....	53
FIGURA 3.15 RADIACIÓN DE ONDA CORTA ENTRANTE R _s ↓ Y SUS COMPONENTES.....	57
FIGURA 3.165 DIAGRAMA RADIACIÓN DE ONDA LARGA ENTRANTE R _L ↓ Y SUS COMPONENTES.....	60
FIGURA 3.17 DIAGRAMA RADIACIÓN DE ONDA LARGA SALIENTE R _L ↑ Y SUS COMPONENTES	62
FIGURA 3.18 DIAGRAMA GENERAL PARA INTERFAZ DE METODOLOGÍA AUTOMATIZADA	74
FIGURA 3.19 ESQUEMA INTERFAZ METODOLOGÍA AUTOMATIZADA	74
FIGURA 4.1 VARIACIÓN TEMPORAL DE NDVI, VALORES ESTIMADOS	81
FIGURA 4.2 GRÁFICA (A) DE VALORES ESTIMADOS	82
FIGURA 4.3 GRÁFICA (Ts) DE VALORES OBSERVADOS VS VALORES ESTIMADOS.....	83
FIGURA 4.4 GRÁFICA (R _n) DE VALORES OBSERVADOS VS VALORES ESTIMADOS	85
FIGURA 4.5 GRÁFICA (ET) DE VALORES OBSERVADOS VS VALORES ESTIMADOS	86
FIGURA 4.6 VALORES 1:1 LST LANDSAT 8 Y VALORES 1:1 Ts A 20 CM	88
FIGURA 4.7 GRÁFICA DE DISPERSIÓN TEMPERATURA DE SUELO 20 CM VS TEMPERATURA DE SUELO ESTIMADA CON IMÁGENES LANDSAT 8.....	89
FIGURA 4.8 OBSERVADOS VS ESTIMADOS DE RADIACIÓN NETA	90
FIGURA 4.9 OBSERVADOS VS ESTIMADOS DE EVAPOTRANSPIRACIÓN	90
FIGURA 4.10 INCORPORACIÓN DEL MÓDULO TMFREE AL SOFTWARE TERRSET	92
FIGURA 4.11 VENTANA PRINCIPAL DEL MÓDULO TMFREE	93
FIGURA 4.12 VENTANA PARA DATOS DE ENTRADA	93
FIGURA 4.13 VENTANA PARA INGRESAR BANDA POR BANDA	94
FIGURA 4.14 VENTANA PARA INGRESAR BANDAS POR MEDIO DE UN GRUPO RASTER.....	94
FIGURA 4.15 VENTANA PARA LA ESTIMACIÓN DE ÍNDICES DE VEGETACIÓN	95
FIGURA 4.16 VENTANA PARA LA ESTIMACIÓN DE RADIACIÓN DE ONDA CORTA ENTRANTE	95
FIGURA 4.17 VENTANA PARA LA ESTIMACIÓN DE ALBEDO DE SUPERFICIE	96
FIGURA 4.18 VENTANA PARA LA ESTIMACIÓN DE TEMPERATURA DE SUPERFICIE.....	96

FIGURA 4.19 VENTANA PARA LA ESTIMACIÓN DE RADIACIÓN DE ONDA LARGA SALIENTE	97
FIGURA 4.20 VENTANA PARA LA ESTIMACIÓN DE EMISIVIDAD	98
FIGURA 4.21 VENTANA PARA LA ESTIMACIÓN DE RADIACIÓN DE ONDA LARGA ENTRANTE	98
FIGURA 4.22 VENTANA PARA LA ESTIMACIÓN DE RADIACIÓN NETA.....	99
FIGURA 4.23 VENTANA PARA LA ESTIMACIÓN DE EVAPOTRANSPIRACIÓN	100
FIGURA 4.24 VENTANA PRINCIPAL AL TERMINAR EL CICLO DE ESTIMACIÓN	101
FIGURA 4.25 DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DEL (NDVI) CORRESPONDIENTE A LA FECHA 04 DE ABRIL DE 2017	102
FIGURA 4.26 DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DEL ALBEDO DE SUPERFICIE (A) CORRESPONDIENTE A LA FECHA 04 DE ABRIL DE 2017....	103
FIGURA 4.27 DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA TEMPERATURA DE SUPERFICIE (Ts) CORRESPONDIENTE A LA FECHA 04 DE ABRIL DE 2017	104
FIGURA 4.28 DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA RADIACIÓN NETA R_n CORRESPONDIENTE A LA FECHA 04 DE ABRIL DE 2017	105
FIGURA 4.29 DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN (ET) CORRESPONDIENTE A LA FECHA 04 DE ABRIL DE 2017	106
FIGURA 4.30 MAPAS EVAPOTRANSPIRACIÓN POR FECHA DE ESTIMACIÓN	108
FIGURA 7.1 ESQUEMA DE INTERFAZ	128
FIGURA 7.2 BARRA DE MENÚ.....	128
FIGURA 7.3 INTERFAZ DEL MÓDULO TMFREE	130
FIGURA 7.4 MENÚ DEL MÓDULO TMFREE.....	130
FIGURA 7.5 BARRA DE HERRAMIENTAS TERRSET.....	132
FIGURA 7.6 ENTRADA DE METADATOS.....	133
FIGURA 7.7 INGRESO DE METADATOS FORMATO .TXT	134
FIGURA 7.8 ENTRADA DE DATOS	134
FIGURA 7.9 ENTRADA DE BANDAS LANDSAT 8.....	135
FIGURA 7.10 INGRESO BANDA POR BANDA PARA ESTIMACIÓN DE (RN)	136
FIGURA 7.11 SELECCIÓN DE BANDAS LANDSAT 8.....	136
FIGURA 7.12 PRE-PROCESAMIENTO BANDA POR BANDA DEL MÓDULO TMFREE	137
FIGURA 7.13 PRE-PROCESAMIENTO BANDA POR BANDA COMPLETADO	137
FIGURA 7.14 INGRESO DE DATOS MEDIANTE RASTER GROUP	138
FIGURA 7.15 INGRESO DE BANDAS MEDIANTE GRUPO RASTER.....	138
FIGURA 7.16 PRE-PROCESAMIENTO MEDIANTE GRUPO RASTER DEL MÓDULO TMFREE	139
FIGURA 7.17 PRE-PROCESAMIENTO POR GRUPO RASTER COMPLETADO.....	140
FIGURA 7.18 NOMBRE DE SALIDA ESTIMACIÓN DE ÍNDICES DE VEGETACIÓN	141
FIGURA 7.19 ESTIMACIÓN DE ÍNDICES DE VEGETACIÓN TERMINADA	141
FIGURA 7.20 ESTIMACIÓN DE RADIACIÓN DE ONDA CORTA ENTRANTE TERMINADA.....	142
FIGURA 7.21 NOMBRE DE SALIDA ESTIMACIÓN DE ALBEDO DE SUPERFICIE	142
FIGURA 7.22 ESTIMACIÓN DE ALBEDO DE SUPERFICIE TERMINADA	143
FIGURA 7.23 NOMBRE DE SALIDA ESTIMACIÓN TEMPERATURA DE SUPERFICIE	143
FIGURA 7.24 ESTIMACIÓN DE TEMPERATURA DE SUPERFICIE TERMINADA	144
FIGURA 7.25 NOMBRE DE SALIDA ESTIMACIÓN DE RADIACIÓN DE ONDA LARGA SALIENTE	145
FIGURA 7.26 ESTIMACIÓN DE RADIACIÓN DE ONDA LARGA SALIENTE TERMINADA	145
FIGURA 7.27 VENTANA PARA LA ESTIMACIÓN DE EMISIVIDAD	146
FIGURA 7.28 VENTANA PARA LA ESTIMACIÓN DE RADIACIÓN DE ONDA LARGA ENTRANTE	146
FIGURA 7.29 NOMBRE DE SALIDA ESTIMACIÓN RADIACIÓN NETA	147
FIGURA 7.30 ESTIMACIÓN DE RADIACIÓN NETA TERMINADA	148
FIGURA 7.31 NOMBRE DE SALIDA ESTIMACIÓN DE EVAPOTRANSPIRACIÓN	148
FIGURA 7.32 ESTIMACIÓN DE EVAPOTRANSPIRACIÓN TERMINADA	149

ÍNDICE DE ECUACIONES

ECUACIÓN 2.1 MÉTODO HARGREAVES.....	17
ECUACIÓN 2.2 MÉTODO THORNTHWAITE.....	17
ECUACIÓN 2.3 MÉTODO PENMAN-MONTEITH FAO98.....	18
ECUACIÓN 2.4 BALANCE DE ENERGÍA.....	19
ECUACIÓN 3.1 EVAPOTRANSPIRACIÓN.....	44
ECUACIÓN 3.2 RADIANCIA ESPECTRAL $L\lambda$	46
ECUACIÓN 3.3 REFLECTANCIA ESPECTRAL TOA SIN CORRECCIÓN PARA ÁNGULO SOLAR $\rho\lambda'$	47
ECUACIÓN 3.4 REFLECTANCIA $\rho\lambda$	47
ECUACIÓN 3.5 ÁNGULO CENITAL SOLAR LOCAL (θ_{sz}).....	48
ECUACIÓN 3.6 RADIACIÓN NETA Rn	50
ECUACIÓN 3.7 ALBEDO α	52
ECUACIÓN 3.8 ALBEDO AJUSTADO POR LA TRANSMISIVIDAD ATMOSFÉRICA αTOA	53
ECUACIÓN 3.9 TRANSMISIVIDAD ATMOSFÉRICA τ_{OC}	54
ECUACIÓN 3.10 PRESIÓN ATMOSFÉRICA P	55
ECUACIÓN 3.11 ÁNGULO CENITAL DEL SOL θ	55
ECUACIÓN 3.12 AGUA PRECIPITABLE W	55
ECUACIÓN 3.13 PRESIÓN REAL DE VAPOR e_a	56
ECUACIÓN 3.14 PRESIÓN DE SATURACIÓN DE VAPOR A LA TEMPERATURA e_0	56
ECUACIÓN 3.15 RADIACIÓN DE ONDA CORTA ENTRANTE $R_s \downarrow$	56
ECUACIÓN 3.16 DISTANCIA RELATIVA TIERRA-SOL dr	57
ECUACIÓN 3.17 RADIACIÓN DE ONDA LARGA ENTRANTE $RL \downarrow$	59
ECUACIÓN 3.18 EMISIVIDAD ATMOSFÉRICA ϵ_a	60
ECUACIÓN 3.19 RADIACIÓN DE ONDA LARGA SALIENTE $RL \uparrow$	61
ECUACIÓN 3.20 ÍNDICE DE VEGETACIÓN AJUSTADO AL SUELO (SAVI)	63
ECUACIÓN 3.21 TEMPERATURA DE SUPERFICIE T_s	64
ECUACIÓN 3.22 TEMPERATURA DE BRILLO (T)	65
ECUACIÓN 3.23 CONTENIDO DE VAPOR EN EL AGUA (w).....	66
ECUACIÓN 3.24 ÍNDICE DE VEGETACIÓN DE DIFERENCIA NORMALIZADA $NDVI$	67
ECUACIÓN 3.25 PROPORCIÓN DE LA VEGETACIÓN (PV)	68
ECUACIÓN 3.26 ÍNDICE DE EMISIVIDAD BANDA 10 (CI10)	69
ECUACIÓN 3.27 EMISIVIDAD MIXTA BANDA 10 (EMIX10)	69
ECUACIÓN 3.28 EMISIVIDAD BANDA 10 (EB10).....	70
ECUACIÓN 3.29 ÍNDICE DE EMISIVIDAD BANDA 11 (CI11)	70
ECUACIÓN 3.30 EMISIVIDAD MIXTA BANDA 11 (EMIX11)	70
ECUACIÓN 3.31 EMISIVIDAD BANDA 11 (EB11).....	71
ECUACIÓN 3.32 EMISIVIDAD PROMEDIO.....	71
ECUACIÓN 3.33 EMISIVIDAD DELTA ($\Delta\epsilon$)	72
ECUACIÓN 3.34 RAÍZ DEL ERROR CUADRÁTICO MEDIO (RMSE).....	72
ECUACIÓN 3.35 SESGO (B)	73
ECUACIÓN 3.36 EFICIENCIA (NSE)	73

ACRÓNIMOS

ALOS	Satélite Avanzado de Observación Terrestre (Advanced Land Observing Satellite)
API	Interfaz de programación de aplicaciones (Applications Programming Interface)
ASTER	Radiómetro Avanzado de Emisión y Reflexión Térmica Espacial (Advanced Spatial Thermal Emission and Radiometric Reflection)
ATSR	Radiómetro de exploración longitudinal (Along Track Scanning Radiometer)
AVHRR	Radiómetro avanzado de resolución muy elevada (Advanced Very High Resolution Radiometer)
AVNIR-2	Radiómetro avanzado en el visible e infrarrojo cercano tipo 2 (Advanced Visible and Near Infrared Radiometer type 2)
BQA	Banda de evaluación o de control de calidad (Quality Assessment Band)
CD-ROM	Disco compacto con memoria de solo lectura (Compact Disc Read-Only Memory)
CERES	Sistema de Energía Radiante de la Tierra y de las Nubes (Clouds and Earth, Radiant Energy of the System)
DVD	Disco versátil digital (Digital Versatile Disc)
ENVISAT-1	Satélite Ambiental (Environmental Satellite)
ERS	Satélite Europeo de Teledetección (European Remote Sensing Satellite)
ETM+	Mapeador temático mejorado (Enhanced Thematic Mapper)
EUA	Estados Unidos de América
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (Food and Agriculture Organization)
GEO	Órbita Geoestacionaria (Geocentric Earth Orbit)
GIS	Sistema de información geográfica (geographic information systems)
GOME	Experimento de monitoreo de ozono global (Global Ozone Monitoring Experiment)
HEO	Órbita terrestre alta (high earth orbit)
HRV-IR	Alta resolución visible infrarroja (High Resolution Visible IR)
HVR	Alta resolución visible (High Resolution Visible)
IDE	Entorno de desarrollo integrado (Integrated Development Environment)
IITCA	Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua

INEGI	Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática
LCT	Terminales de comunicación láser (Laser Communication Terminal)
LEO	Órbita terrestre baja (low earth orbit)
MEO	Órbita terrestre media (middle earth orbit)
MERIS	Espectrómetro de Imágenes de Resolución Media (Medium Resolution Imaging Spectrometer)
METRIC	Mapeo de la evapotranspiración en alta resolución y con calibración internalizada (Mapping Evapotranspiration at High Resolution using Internalized Calibration)
MexFlux	Consortio Mexicano de Eddy Covarianza
MISR	Multiángulo de imágenes espectroradiométricas (Multi-angle spectroradiometric images)
MODIS	Imágenes Espectroradiométricas de Resolución Moderada (Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer)
MOPITT	Mediciones de la Contaminación en la Tropósfera (measurements of pollution in the troposphere)
MS	Imagen multiespectral (Multispectral)
MSI	Instrumento Óptico Multiespectral (MutiSpectral Instrument)
MSS	Escáner multiespectral (Multi Spectral Scanner)
MWR	Radiómetro de Microondas (Microwave Sounder)
NASA	Aeronáutica Nacional y Administración Espacial (National Aeronautics and Space Administration)
ND	Número digital
NOAA	Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (National Oceanic and Atmospheric Administration)
NSE	Eficiencia de Nash-Sutcliffe (Nash–Sutcliffe efficiency)
OLI	Sensor operacional de imágenes de tierra (Operational Land Imager)
PAN	Película Pancromática (Panchromatic line)
POO	Programación Orientada a Objetos
PRARE	Equipo de rango preciso y rango de velocidad (Precise Range And Range-Rate Equipment)
RA	Altímetro (Radar Altimeter)
RMSE	Error cuadrático medio (Root Mean Squared Error)
SAR	Radar de Apertura Sintética (Synthetic Aperture Radar)

SEBAL	Algoritmo de balance de energía superficial para tierra (Surface Energy Balance Algorithm for Land)
SPOT	Satélite de observación terrestre (Satellite Pour l'Observation de la Terre)
SSEB	Balance de energía superficial simplificado (Simplified Surface Energy Balance)
TIRS	Sensor Térmico Infrarrojo (Thermal Infrared Sensor)
TM	Mapeador Temático (Thematic Mapper)
TMFREE	TerrSet Module FoR Evapotranspiration Estimation through Landsat 8
TOR	Seguimiento, ocultación y rango (Tracking, Occultation and Ranging)
UAEMéx	Universidad Autónoma del Estado de México
UAQ	Universidad Autónoma de Querétaro
UNEP	Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (United Nations Environment Programme)
USGS	Servicio Geológico de los Estados Unidos (United States Geological Survey)
VBA	Visual Basic para Aplicaciones (Visual Basic for Applications)
WS	Difusómetro (Wind Scatterometer)

NOMENCLATURA Y UNIDADES

SÍMBOLO	DEFINICIÓN	UNIDAD
W'	Agua precipitable	<i>mm</i>
α_{TOA}	Albedo ajustado por la transmisividad atmosférica	<i>Adimensional</i>
A	Albedo de superficie	<i>Adimensional</i>
α_{toa}	Albedo en la parte superior de la atmósfera	<i>Adimensional</i>
θ	Ángulo cenital del Sol	°
θ_{sz}	Ángulo cenital solar	°
θ_{SE}	Ángulo de elevación del Sol	°
Q_{cal}	Banda Landsat 8	<i>Adimensional</i>
C_p	Calor específico del aire	<i>J/kg/K</i>
$w\lambda$	Coefficiente de ponderación de la banda	<i>Adimensional</i>
k_t	Coefficiente de turbidez del aire	<i>Adimensional</i>
c_1	Coefficiente metodología Split Window Algorithm	<i>Adimensional</i>
c_2	Coefficiente metodología Split Window Algorithm	<i>Adimensional</i>
c_3	Coefficiente metodología Split Window Algorithm	<i>Adimensional</i>
c_4	Coefficiente metodología Split Window Algorithm	<i>Adimensional</i>
c_5	Coefficiente metodología Split Window Algorithm	<i>Adimensional</i>
c_6	Coefficiente metodología Split Window Algorithm	<i>Adimensional</i>
c_0	Coefficiente metodología Split Window Algorithm	<i>Adimensional</i>
k_1	Constante de conversión térmica	<i>Adimensional</i>
k_2	Constante de conversión térmica	<i>Adimensional</i>
σ	Constante de Stefan-Boltzmann	<i>Wm⁻²/K⁴</i>
γ	Constante psicrométrica	<i>kPa °C⁻¹</i>
G_{sc}	Constante solar	<i>Wm⁻²</i>
w	Contenido de vapor de agua	<i>g cm⁻²</i>
$e_s - e_a$	Déficit de presión de vapor	<i>kPa</i>
$\Delta\varepsilon$	Delta emisividad	<i>Adimensional</i>
ρ	Densidad del aire	<i>kg/m³</i>
A	Densidad del aire	<i>g m⁻³</i>
DOY	Día secuencial del año	<i>Adimensional</i>
dT	Diferencia de temperatura entre dos alturas	<i>K</i>
dr	Distancia relativa Tierra-Sol	<i>Adimensional</i>
z	Elevación sobre el nivel del mar	<i>msnm</i>
ε	Emisividad	<i>Adimensional</i>
ε_a	Emisividad atmosférica	<i>Adimensional</i>
$eb10$	Emisividad banda 10	<i>Adimensional</i>
$eb11$	Emisividad banda 11	<i>Adimensional</i>
ε_{NB}	Emisividad de la superficie de banda estrecha	<i>Adimensional</i>
e_{agua10}	Emisividad en el agua banda 10	<i>Adimensional</i>
e_{agua11}	Emisividad en el agua banda 11	<i>Adimensional</i>
$esuelo10$	Emisividad en el suelo banda 10	<i>Adimensional</i>
$esuelo11$	Emisividad en el suelo banda 11	<i>Adimensional</i>

<i>eveg10</i>	Emisividad en la vegetación banda 10	<i>Adimensional</i>
<i>eveg11</i>	Emisividad en la vegetación banda 11	<i>Adimensional</i>
<i>emix10</i>	Emisividad mixta banda 10	<i>Adimensional</i>
<i>emix10_1</i>	Emisividad mixta banda 10	<i>Adimensional</i>
<i>emix11</i>	Emisividad mixta banda 11	<i>Adimensional</i>
<i>emix11_1</i>	Emisividad mixta banda 11	<i>Adimensional</i>
<i>e prom</i>	Emisividad promedio	<i>Adimensional</i>
ϵ_0	Emisividad térmica superficial de la banda ancha	<i>Adimensional</i>
<i>ET</i>	Evapotranspiración	<i>mm día⁻¹</i>
<i>ET₀</i>	Evapotranspiración de referencia	<i>mm día⁻¹</i>
<i>Ep</i>	Evapotranspiración potencial mensual	<i>mm</i>
<i>L</i>	Factor de ajuste de suelo desnudo	<i>Adimensional</i>
<i>LA</i>	Factor de corrección	<i>Adimensional</i>
<i>A_p</i>	Factor de escala aditivo de Reflectancia para la banda	<i>Adimensional</i>
<i>AL</i>	Factor de escala aditivo radiante para la banda	<i>Adimensional</i>
<i>ML</i>	Factor de escala multiplicativo de radiancia para la banda	<i>Adimensional</i>
<i>M_p</i>	Factor de escala multiplicativo de Reflectancia para la banda	<i>Adimensional</i>
<i>G</i>	Flujo de calor en el suelo	<i>Wm⁻²</i>
<i>λLE</i>	Flujo de calor latente	<i>W m⁻²</i>
<i>H</i>	Flujo de calor sensible	<i>Wm⁻²</i>
<i>G'</i>	Flujo del calor en de suelo	<i>MJ m⁻² día⁻¹</i>
<i>HR</i>	Humedad relativa	<i>%</i>
<i>LAI</i>	Índice de área foliar	<i>Adimensional</i>
<i>ci10</i>	Índice de emisividad banda 10	<i>Adimensional</i>
<i>ci11</i>	Índice de emisividad banda 11	<i>Adimensional</i>
<i>SAVI</i>	Índice de vegetación ajustado al suelo	<i>Adimensional</i>
<i>NDVI_v</i>	Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada a la vegetación	<i>Adimensional</i>
<i>NDVI_s</i>	Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada al suelo	<i>Adimensional</i>
<i>NDVI_a</i>	Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada en el agua	<i>Adimensional</i>
<i>NDVI_{mix}</i>	Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada mixta	<i>Adimensional</i>
<i>NDVI</i>	Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada	<i>Adimensional</i>
<i>DN</i>	Número digital	<i>Adimensional</i>
Δ	Pendiente de la curva de presión de vapor	<i>kPa °C⁻¹</i>
$\alpha_{PATH_RADIANCE}$	Porción promedio de la radiación solar entrante	<i>Adimensional</i>
<i>P</i>	Presión atmosférica	<i>kPa</i>
e^0	Presión de saturación de vapor a la temperatura	<i>kPa</i>
e_s	Presión de vapor de saturación	<i>kPa</i>
e_a	Presión real de vapor	<i>kPa</i>
<i>PV</i>	Proporción de la vegetación	<i>Adimensional</i>
<i>E</i>	Proporción de saturación de mezcla	<i>g kg</i>

$R_{s\downarrow}$	Radiación de onda corta entrante	Wm^{-2}
$R_{L\downarrow}$	Radiación de onda larga entrante	Wm^{-2}
$R_{L\uparrow}$	Radiación de onda larga saliente	Wm^{-2}
R_a	Radiación extraterrestre	$mm \text{ día}^{-1}$
R_n	Radiación neta	Wm^{-2}
Rn'	Radiación neta en la superficie del cultivo	$MJ m^{-2} \text{ día}^{-1}$
R_s	Radiación solar incidente	$mm \text{ día}$
L_λ	Radiancia espectral de cada banda (1-7)	$W/(m^2 * sr * \mu m)$
P_λ	Reflectancia	Adimensional
ρ_λ'	Reflectancia espectral TOA, sin corrección	Adimensional
ρ_4	Reflectividad para la banda 4	Adimensional
ρ_5	Reflectividad para la banda 5	Adimensional
r_{ah}	Resistencia aerodinámica al transporte de calor	s/m
E	Saturación de mezcla	$g \text{ kg}$
$T_{ambiente}$	Temperatura ambiente	$^\circ C$
T_i	Temperatura de brillo banda 10	K
T_j	Temperatura de brillo banda 11	K
T	Temperatura de brillo de la atmósfera	K
T_s	Temperatura de superficie terrestre	K
T	Temperatura del aire a 2 m de altura	$^\circ C$
T_a	Temperatura en el aire	$^\circ C$
t_{med}	Temperatura media	$^\circ C$
t	Temperatura media mensual del aire	$^\circ C$
l	Total de los 12 valores mensuales del índice de calor	Adimensional
Toc	Transmisividad atmosférica	Adimensional
u_2	Velocidad del viento a 2 m de altura	$m s^{-1}$

1. INTRODUCCIÓN

La UNEP define las zonas semiáridas a aquellas zonas donde la relación entre Precipitación/Evapotranspiración (P/ET) es de 0.20-0.50 (Salas, 2000). A nivel mundial (Gálvez, 2011) las zonas semiáridas ocupan el 47% de la superficie terrestre y en ellas habitan 70% de la población mundial con una superficie de 36 millones de km² (Díaz-Padilla et al., 2011). Estas zonas pueden soportar la agricultura de temporal con niveles de producción más o menos sustentables y producción de ganado sedentario (Holtz, 2003).

A pesar de su importancia, la hidrología de zonas áridas y semiáridas no ha recibido atención como la recibida en otras regiones climáticas. Sin embargo, recientemente se está haciendo un gran esfuerzo para entender la variabilidad en los flujos y procesos que ocurren en este tipo de ambientes (Gálvez, 2011). La conversión de la tierra causa modificaciones del paisaje que frecuentemente afectan el clima local de los ecosistemas (Morales-Romero & Molina-Freaner, 2016). El cambio de uso de suelo es considerado uno de los factores que afecta el clima local a través de modificaciones en el balance de energía y por ende afecta el intercambio de agua entre la vegetación local y la atmósfera. Varios estudios y modelos de ecosistemas reconocen que un componente importante de la dinámica del ecosistema es establecido por la relación entre el balance de energía, el balance hídrico y por la estructura vegetal de las comunidades locales (Morales-Romero & Molina-Freaner, 2016). La alta variabilidad temporal y espacial del balance de energía y su compleja determinación da lugar a varios estudios y modelos utilizando teledetección (Schirmbeck et al., 2018). Las imágenes adquiridas en diferentes regiones del espectro electromagnético permiten determinar propiedades físicas de la superficie, que logran cuantificar la energía y flujos de masa entre la superficie y la atmósfera (Schirmbeck et al., 2018).

Considerando que la evapotranspiración (ET) es el componente del ciclo hidrológico más difícil de estimar debido a sus complejas interacciones en el sistema suelo-planta-atmósfera, pero asimismo es clave en la dinámica y gestión de los recursos hídricos. El presente trabajo tiene como objetivo estimar y validar la evapotranspiración a partir de parámetros de superficie (radiación neta, índices de vegetación, albedo, emisividad, temperatura de superficie) mediante datos meteorológicos e imágenes Landsat 8 en el matorral de la zona semiárida del Altiplano central a fin de aproximar al entendimiento de la dinámica espacio-temporal de los flujos de energía y masa en estos ecosistemas.

1.1. Antecedentes

El conocimiento de entradas, almacenes y pérdidas de agua es crucial para el análisis de los procesos que ocurren en la superficie terrestre y podría incrementar su importancia debido al cambio climático, que aunado a los procesos de desertificación y pérdida de suelo constituyen los problemas más críticos en la conservación de estos ecosistemas. En el planeta, más de un tercio de la superficie terrestre es clasificada como árida y semiárida; y aunque la geografía natural de las tierras secas es compleja y difiere de un sitio a otro, el común de estos sitios son los escasos eventos de precipitación, baja cobertura vegetal y la pérdida de suelo por factores naturales y antrópicos.

Es innegable que las condiciones climáticas actuales difieren de los datos promedio históricos. Sin embargo, estudios recientes indican que los cambios en el clima pueden deberse no a un único factor sino a múltiples causas, no sólo a las altas concentraciones de gases invernadero en la atmósfera, sino también a cambios en la regulación de los ecosistemas, cambios en la circulación general de la atmósfera o a ciclos más o menos regulares en la intensidad de la radiación solar, entre otras (Karlin, 2013).

A fin de entender los procesos de los ecosistemas y las interacciones suelo-planta-atmósfera, existen diversos métodos para evaluar el intercambio de masa y energía, que dependen en gran medida del área de estudio y el interés espacial y temporal. En las últimas décadas se ha aplicado de forma creciente el método de covarianza (Eddy covariance) de flujos turbulentos de energía y masa. Esta técnica *in situ*, no destructiva y que permite mediciones temporales desde fracciones de horas hasta años, ha permitido la caracterización espacial y temporal de múltiples procesos de superficie. El sistema de flujos turbulentos puede ser integrado a los beneficios que confieren las bases de datos satelitales, con sus respectivas adecuaciones y limitantes. Al respecto, son varios los estudios que han integrado las bases puntuales y la teledetección a fin de caracterizar la evapotranspiración en coberturas naturales y cultivos de interés.

El componente evapotranspiración es fundamental en la ecuación de balance de energía (Sánchez et al., 2005), sin embargo, en diversos estudios se excluyen los ecosistemas naturales debido a las dificultades experimentales de la toma de medidas en estas regiones, principalmente por la heterogeneidad de estos sistemas. En este sentido, la teledetección es una herramienta que facilita el estudio de la ET en estas zonas, donde se suponen

aproximaciones que superan 30% de toda la superficie terrestre. Entre estos ecosistemas, los matorrales han sido poco estudiados y aún menos en México (Balbuena et al., 2019).

Si bien es cierto, existen algunas aproximaciones en zonas semiáridas, no se debe olvidar la importancia de los estudios locales toda vez que la heterogeneidad es un componente propio de estos sitios y en especial de la Altiplanicie mexicana, y que no puede ser generalizado a partir de estudios realizados en ecosistemas y latitudes parecidas.

La zona semiárida de la altiplanicie central, como la mayoría de las zonas semiáridas del mundo, es particularmente sensible al cambio climático por ubicarse en un área transicional entre zonas desérticas y áreas húmedas, recibiendo grandes presiones sobre los recursos naturales. Aunado a lo anterior, por su ubicación geográfica se ha convertido en un lugar de conexión y paso al interior del país. Y con ello se ha propiciado el auge de diversas industrias, incrementando la tasa de cambio de uso de suelo, y la demanda creciente de servicios básicos, entre ellos y uno de los más importantes y limitantes “el agua”.

1.2. Justificación

Conocer la disponibilidad hídrica es un tema central en la gestión integrada y sustentable del agua. En este sentido es importante comprender que la disponibilidad hídrica presenta variación espacial y temporal. Los diferentes métodos y enfoques que se han desarrollado y siguen desarrollando para estimar la disponibilidad, son tan variados y su aplicación se centra en la disponibilidad y factibilidad de determinar sus componentes para resolver las interrogantes ¿cuánta?, ¿dónde? y ¿cuándo?.

La evapotranspiración (ET) constituye una de las componentes más importantes en el ciclo hidrológico, considerando que más del 60% de la precipitación vuelve a la atmósfera en forma de ET. Su estimación resulta esencial, pero muy compleja y es por ello por lo que muchas investigaciones se han centrado en resolver cuál es la vía más efectiva de estimar este componente.

Desde hace décadas se ha visto como una opción el desarrollo de técnicas para analizar y dar seguimiento a fenómenos de superficie desde el espacio. Considerando que los datos satelitales brindan mayor cobertura espacial, temporal y radiométrica que otras técnicas de monitoreo. Por supuesto, sin dejar de valorar los datos provenientes de mediciones en campo, considerando que son valores que representan las condiciones reales *in situ*. Integrar ambos enfoques ha resultado ser una herramienta que permite aproximar con mayor detalle y nivel de precisión el seguimiento y monitoreo en el balance de energía y agua.

Los ecosistemas con limitación hídrica cubren más del 30% de la superficie global. En general se considera que son sitios sensibles a los cambios en la intensidad y frecuencia de precipitación, por lo que son recurrentes fenómenos como la desertificación y sequías, con todos los efectos ambientales y socioeconómicos que estos conllevan (Becerril-Piña et al., 2015; Cerda et al., 2011; Holtz, 2003).

Por lo que, conocer el balance de energía en zonas semiáridas sirve para mejorar el entendimiento de los flujos de masa y energía, así como su repercusión sobre las necesidades y rendimiento de los cultivos (Ordóñez et al., 2001), la disponibilidad hídrica de una cuenca, previsión del clima local y regional. Asimismo, un mayor entendimiento de estos ecosistemas permite ajustar los balances globales y regionales de carbono y agua, y por tanto mejorar la modelación referente a los efectos del posible cambio climático.

En México las zonas semiáridas presentan diversas variantes propias de su estructura, composición y orografía; es así que estudios regionales son la base para mejorar el entendimiento respecto a la disponibilidad hídrica local y regional, considerando que en muchas de estas regiones son espacios donde la industria, agricultura y urbanización pende de un hilo por la escasez de agua.

En este panorama se encuentra la región del Altiplano central de México, donde la tasa de cambio de uso de suelo se ha incrementado en las últimas tres décadas, convirtiendo en un mosaico de coberturas. Una de las coberturas naturales más abundante en México, son los matorrales, estos cubren aproximadamente el 30% del territorio mexicano y representan uno de los ecosistemas más importantes por su contribución a endemismos del país. Sin embargo, son pocos los estudios encaminados a analizar y mejorar el entendimiento de su funcionamiento.

Es así como este trabajo se centra en la fusión y validación de técnicas de teledetección y mediciones puntuales de flujos de energía, a fin de integrar una serie metodológica que permita estimar la evapotranspiración en la región semiárida del Altiplano central de México.

1.3. Hipótesis

El uso de parámetros de superficie estimados mediante datos meteorológicos e imágenes de satélite permitirá integrar una metodología para la estimación de la evapotranspiración del matorral xerófilo en la zona semiárida del Altiplano de Querétaro.

1.4. Objetivos

1.4.1. General

Integrar, validar y automatizar una metodología para estimar evapotranspiración para matorral xerófilo, mediante datos meteorológicos y teledetección.

1.4.2. Específicos

- Integrar base de datos meteorológica de la zona de estudio, a partir de los registros 30 minutarios meteorológicos, radiación neta y evapotranspiración real de la estación Bernal, para analizar la disponibilidad y efectividad de los registros.
- Integrar base de datos satelital de la zona de estudio, a partir de imágenes del sensor Landsat 8 para estimar evapotranspiración real.
- Integrar las metodologías para estimar: índices de vegetación, albedo, emisividad de superficie, emisividad atmosférica, longitud de onda corta entrante/saliente, longitud de onda larga entrante/saliente, temperatura de superficie y radiación neta para determinar la evapotranspiración real.
- Contrastar los registros de la estación Bernal con los valores estimados a partir de datos meteorológicos e imágenes de satélite, para calibrar y validar la metodología para estimar evapotranspiración real.
- Implementar módulos y submódulos en TerrSet para automatizar la estimación de la evapotranspiración real mediante aplicación.
- Elaborar un manual de usuario de la aplicación para facilitar su uso/aplicación.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Zonas semiáridas

Una de las características de las zonas de clima árido y semiárido es la baja disponibilidad de agua, cuantificada a partir de la precipitación media anual, en relación con la evaporación de un área geográfica determinada (Águila, 2013). Así mismo, las zonas semiáridas tienen una importancia especial, ubicadas entre las zonas áridas y húmedas, son más susceptibles y vulnerables a las variaciones climáticas (Salas, 2000). El principal factor limitante en zonas de clima árido y semiárido es la disponibilidad de agua. La cantidad y disponibilidad estacional del agua son primordiales para la supervivencia a largo plazo y para la distribución de las plantas (Gálvez, 2011).

Las zonas áridas y semiáridas de México se encuentran desde el norte hasta el centro de México (Rzedowski, 1981) y albergan ecosistemas de alta diversidad (alrededor de 600 especies de plantas) y un número importante de endemismos: el 65% de los géneros y el 60% de las especies presentes son endémicas de la región (Rzedowski, 1991).

El interés por estas zonas ha cobrado especial importancia en los últimos años debido a ciertos síntomas, tales como el incremento significativo de la temperatura media anual o como el cambio brusco observado en ciertas variables hidrológicas, tales como la precipitación y las descargas en ríos (Salas, 2000). Debido a la situación de la República Mexicana con respecto a la zona subtropical de alta presión, y a la orientación general de sus principales sierras, existen en nuestro país, amplias regiones con climas áridos (Medrano, 2012). En estas zonas áridas y semiáridas, el agua es un factor limitante para el desarrollo de la vegetación (Wiegand et al., 1999). Las plantas deben aprovechar al máximo las escasas e irregulares precipitaciones; en estas condiciones, las especies de plantas se han adaptado para tolerar la sequía (Whitford, 1986).

2.2 Matorral Xerófilo

La cubierta vegetal de las regiones de clima árido y semiárido de México es tan variada, desde el punto de vista fisonómico. Rzedowski, (1981) reconoció y denominó para esta parte del país una serie de tipos de vegetación caracterizados por su aspecto sobresaliente. Sin embargo, al enfocar el problema a nivel nacional y, sobre todo el conocimiento aún defectuoso de muchas porciones del país, resulta recomendable reunir todas comunidades de

tipo arbustivo, propias de las zonas áridas y semiáridas bajo el rubro colectivo de matorral xerófilo (Rzedowski, 1981).

En términos geológicos, hace 2000 años ocurrió una de las erupciones volcánicas más recientes en la serranía del Ajusco, en el sur del Valle de México. El flujo de lava del volcán Xitle y otros conos menores se extendió hacia áreas de menor altitud y cubrió un área de unos 80 km² (Castillo-Argüero et al., 2004). Al enfriarse la lava formó una capa pétreo, sobre la cual, con el paso del tiempo, han tenido lugar procesos sucesionales cuyo ritmo ha dependido de la acumulación de suelo y de la humedad ambiental, factores que a su vez varían en gran medida con la altitud (Cano-Santana & Meave, 2009). Como resultado surgió un complejo mosaico de comunidades vegetales (bosques de Pinus, Abies, Alnus y Quercus, matorral de Quercus y matorral xerófilo) distribuidas en un gradiente altitudinal de 2,250 a 3,100 m (Rzedowski, 1981).

El matorral xerófilo se desarrolló en las partes más bajas, entre las cotas de 2,200 y 2,500 msnm (Castillo-Argüero et al., 2004). Es una de las comunidades vegetales más importantes de México, debido a que ocupa alrededor de 30% de la superficie total del país, además de ser el tipo de vegetación con el mayor número de plantas endémicas y con una riqueza florística calculada en alrededor de 6000 especies (Alanís-Rodríguez et al., 2015). Este tipo de ecosistemas se caracterizan por presentar mosaicos o parches de suelo desnudo y vegetación, formando lo que se denomina “islas de fertilidad”. Se considera que éstas son las unidades básicas que permiten la estabilidad y productividad de este tipo de ecosistemas (Muñoz et al., 2017).

2.3 Evapotranspiración

Se conoce como evapotranspiración la combinación de dos procesos separados por los que el agua se pierde a través de la superficie del suelo por evaporación y por otra parte mediante transpiración de las plantas (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 2012).

La ET participa en el ciclo hidrológico, al permitir la transferencia de agua entre la superficie terrestre y la atmósfera. El proceso de ET requiere de una fuente de energía que permita el cambio de estado físico del agua y proceda su difusión; esta fuente de energía es la radiación solar, por ello, la ET interviene también en el balance de energía superficial (Sánchez, 2001).

Fue la dificultad de discriminar evaporación y transpiración en condiciones naturales, lo que obligó a introducir el concepto de evapotranspiración. La ET se expresa en milímetros (mm) por unidad de tiempo. Esta unidad expresa la cantidad de agua perdida de una superficie cultivada en unidades de altura de agua (Allen et al., 2012).

Uno de los aspectos más importantes en estudios sobre hidrología y climatología es la determinación de la ET, pero la medida directa de este parámetro conlleva muchas dificultades. Por este motivo durante la última década se han propuesto una amplia variedad de métodos para su estimación, desde los métodos clásicos que permiten obtener ET a escala local a partir de medidas de campo, incluyendo lisímetro, técnicas micrometeorológicas, coeficientes de transpiración, hasta los modelos más recientes que integran técnicas de teledetección (Sánchez et al., 2005).

2.3.1 Evaporación

La evaporación es el proceso físico donde existe un cambio de fase de líquido a gaseoso. Para cambiar el estado de las moléculas del agua de líquido a vapor de agua se requiere energía. La radiación solar directa, y en menor grado, la temperatura del aire, proporcionan esta energía (Allen, Tasumi, Trezza, Waters, & Bastiaanssen, 2002). La cantidad de evaporación que ocurre depende principalmente de la disponibilidad de la energía disponible en la superficie y en menor grado, por el aire circundante que transfiere aire húmedo hacia la atmósfera (Rivera-Ñavincopa, 2018). El agua se evapora de una variedad de superficies, tales como lagos, ríos, caminos, suelos y la vegetación mojada (Allen et al., 2012).

Incluye tanto la evaporación de agua líquida o sólida directamente desde el suelo o desde las superficies vegetales (rocío, escarcha, lluvia interceptada por la vegetación), como las pérdidas de agua a través de las superficies vegetales, particularmente las hojas.

La cantidad de evaporación que ocurre depende principalmente de la disponibilidad de energía en la superficie y en menor grado, por el aire circundante que transfiere aire húmedo hacia la atmósfera (Burnett, 2007).

2.3.2 Transpiración

La transpiración consiste en la vaporización del agua líquida contenida en los tejidos de la planta y su posterior remoción hacia la atmósfera (Allen et al., 2012). Del agua absorbida por

el sistema de raíces de una planta, sólo una porción minúscula permanece en los tejidos de la misma; virtualmente, toda el agua retorna a la atmósfera en forma de vapor, debido a este proceso (Linsley et al., 1977).

Depende, al igual que la evaporación, del suministro de energía para el cambio de fase, junto con el gradiente de presión de vapor entre el aire húmedo saturado del espacio intercelular y la atmósfera circundante, que es la fuerza impulsora para el transporte de vapor a través de las estomas. Influye además la interacción del viento con la superficie, para el transporte del aire húmedo de la cubierta a la atmósfera (Rivera-Ñavincopa, 2018). La tasa de transpiración también es influenciada por las características del cultivo, el medio donde se produce y las prácticas de cultivo. Las plantas pueden tener diversas tasas de transpiración. Esta diferencia se da no solo por el tipo de cultivo, sino también su estado de desarrollo, el medio donde se produce, su manejo y deben ser consideradas al evaluar la transpiración (Allen et al., 2012).

Es de resaltar que casi toda el agua absorbida por la planta del suelo es transferida a la atmósfera mediante este proceso, manteniéndose en su interior sólo una fracción mínima (Allen et al., 2012). La transpiración depende, del suministro de energía para el cambio de fase, que es la fuerza impulsora para el transporte de vapor a través de las estomas.

2.4 Factores que influyen en la evapotranspiración

2.4.1 Factores climáticos

Las condiciones climáticas dictaminan la cantidad de energía disponible para la evaporación y por lo tanto juegan un rol crítico en la determinación de la ET. Los principales parámetros climáticos que afectan la ET son la radiación, temperatura del aire, humedad atmosférica y la velocidad del viento (Allen et al., 2012).

La radiación brinda grandes cantidades de energía a la vegetación. El viento tiene el rol de transportar el calor que se acumula en las superficies adyacentes lo cual acelera la evaporación. El viento también sirve para acelerar la evaporación incrementando la transferencia de vapor de agua desde las coberturas vegetales húmedas hacia la atmósfera (Brown, 2014).

2.4.2 Factores de cultivo

El tipo de cultivo, la variedad y la etapa de desarrollo deben ser considerados cuando se evalúa la evapotranspiración de cultivos que se desarrollan en áreas grandes y bien manejadas. Las diferencias en resistencia a la transpiración, la altura del cultivo, la rugosidad del cultivo, el reflejo, la cobertura del suelo y las características radiculares del cultivo dan lugar a diferentes niveles de ET en diversos tipos de cultivos aunque se encuentren bajo condiciones ambientales similares (Allen et al., 2012).

2.4.3 Factores ambientales y manejo

Los factores tales como salinidad o baja fertilidad del suelo, uso limitado de fertilizantes, presencia de horizontes duros o impenetrables en el suelo, ausencia de control de enfermedades y de parásitos y el mal manejo del suelo pueden limitar el desarrollo del cultivo y reducir la ET (Allen et al., 2006).

2.5 Métodos para medir la evapotranspiración

Pese a la existencia de un gran número de métodos para evaluar la ET, ninguno es lo suficientemente general para ser aplicado en todas las circunstancias (Llamas, 1993).

Estos métodos pueden dividirse en dos categorías:

- Medición o directos
- Estimación o indirectos

2.5.1 Método directo

Calculan la ET a través del control de ingresos y salidas de agua en el suelo que sustenta una cubierta vegetal; por ello miden y cuantifican directamente la ET en cualquier cultivo o tipo vegetal para las condiciones de suelo, clima y disponibilidad de agua del lugar de estudio (Sánchez, 2001). Estos métodos, aunque entregan mejores resultados cercanos a la realidad, frecuentemente costosos y requieren de bastante tiempo para llegar a resultados concluyentes (Vallejos & José, 1972). Por otra parte, los resultados que se obtienen son puntuales y válidos sólo para los cultivos y las condiciones geográficas en las cuales se han aplicado.

Dadas las condiciones que requieren para su aplicación, estos métodos son utilizados en el estudio de pequeñas áreas y los cálculos se efectúan en el momento del estudio (Sánchez, 2001).

Los métodos directos son numerosos y pueden ordenarse según distintos criterios; no obstante, se mencionan aquí los más utilizados en campo:

Lisímetros

La ET no es simple de medir. Para determinar experimentalmente se requieren aparatos específicos y mediciones precisas de varios parámetros físicos o el balance del agua del suelo en lisímetros (Allen et al., 2012).

Un lisímetro (*Figura 2.1*) es un gran recipiente que encierra una determinada porción de suelo con superficie desnuda o con cubierta vegetal, ubicado en campo para representar condiciones naturales y que se utiliza para determinar la evapotranspiración de un cultivo en crecimiento, de una cubierta vegetal de referencia, o la evaporación de un suelo desnudo (Aboukhaled & Smith, 1986). En su construcción hay que ser muy cuidadoso de restituir el suelo que se excavó en condiciones similares a las que se encontraba (San Román, 2004).

Los lisímetros permiten realizar mediciones directas de las pérdidas de agua de un cultivo y del suelo alrededor de éste, por lo que estas mediciones son ampliamente utilizadas para las etapas de calibración y validación de otros métodos de estimación de ET (Vaughan et al., 2007). El uso del lisímetro permite obtener datos directos de ET en tiempos cortos, sin embargo, son de alto costo y es muy difícil reconstruir las condiciones del suelo original (Glenn et al., 2007).

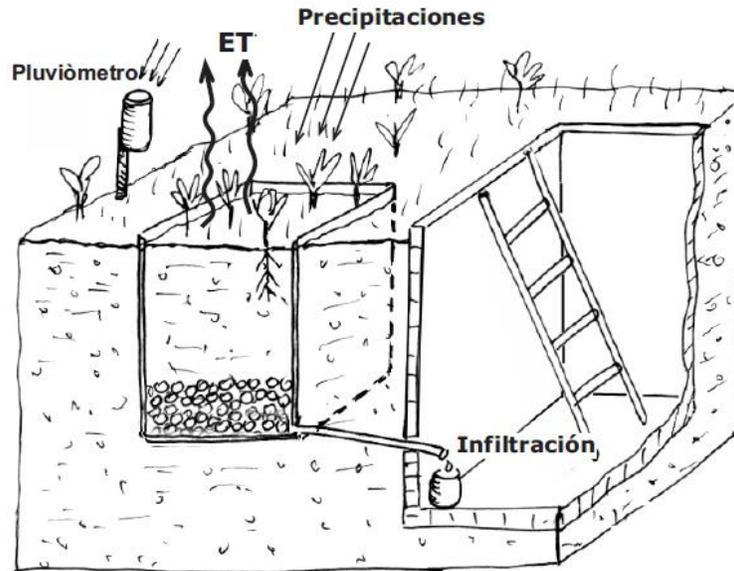


Figura 2.1 Lisímetro (San Román, 2004)

Tanque evaporímetro

Esta técnica es la más conocida en el mundo dado que es el método más simple y barato para estimar la ET (Amayreh, 1995). Es un recipiente cilíndrico de eje vertical abierto hacia la atmósfera (*Figura 2.2*), con un tornillo micrométrico para medir el nivel del agua con precisión, en el cual se mide la variación del nivel del agua provocada por la evaporación en un intervalo de tiempo determinado (Monsalve, 1999).

Uno de los evaporímetros más utilizados en el mundo es el tanque clase A, desarrollado por el U.S. Weather Bureau.

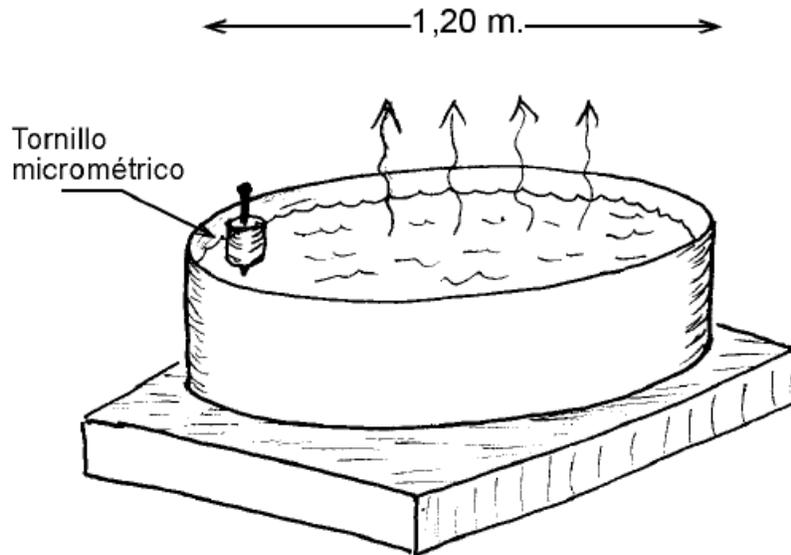


Figura 2.2 Tanque evaporímetro (San Román, 2004)

Fitómetro

Recipiente en el cual se introduce tierra y plantas (**Figura 2.3**). Se cierra el recipiente de manera a asegurarse de que la única pérdida de humedad se hace por transpiración, que se puede evaluar por el cambio de masa de todo el aparato (Llamas, 1993). Cuando el recipiente se llena únicamente con agua, el aparato se llama *potómetro*.

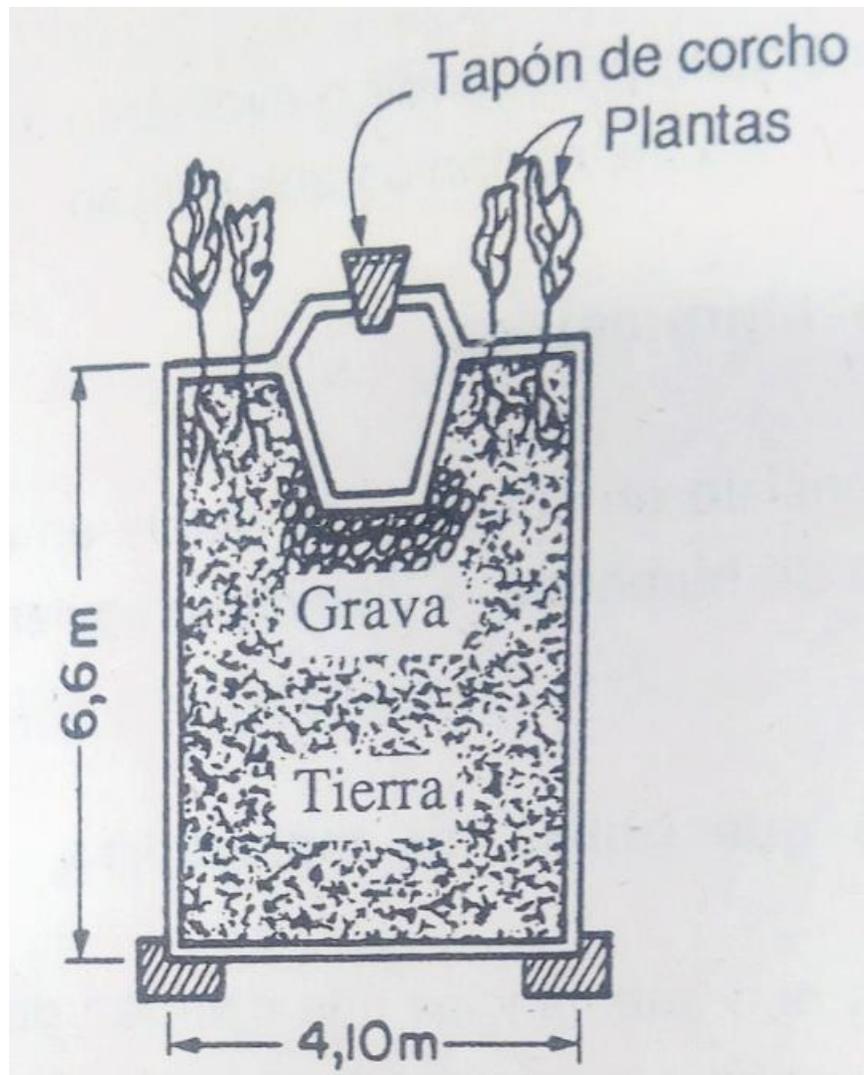


Figura 2.3 Fitómetro (Llamas, 1993)

Cuenca o parcela experimental

Consiste en cambiar la cubierta vegetal de una pequeña superficie de terreno y evaluar la transpiración estableciendo correlaciones entre ésta y la escorrentía de superficie. Para que el método tenga precisión, todos los demás componentes del ciclo hidrológico, precipitación, evaporación, escorrentía, infiltración se miden adecuadamente a intervalos de tiempo muy próximos (Llamas, 1993).

2.5.2 Método indirecto

A pesar de que los métodos directos son más precisos para determinar la ET, éstos son difíciles de aplicar, por ello lo más común en estudios de grandes áreas es utilizar diversas fórmulas, ecuaciones o modelos basados en diferentes variables meteorológicas o climáticas de fácil disposición a partir de la red de estaciones meteorológicas convencionales (Cifuentes, 1971).

Se han propuesto cientos de ecuaciones empíricas, muy variables en cuanto a complejidad, lo que determina que los datos necesarios para aplicarlas sean de disposición variable. El período habitual para el cual se realizan los cálculos de ET con estos métodos ha sido tradicionalmente anual y mensual (Sánchez, 2001).

Monsalve, (1999) define los siguientes conceptos relacionados a la evapotranspiración, y que en la literatura son factibles de encontrar y confundir:

Evapotranspiración potencial (ET_p)

Pérdida de agua observada en una superficie líquida o sólida saturada, por evaporación y por transpiración de las plantas, que ocurriría en el caso que hubiera un adecuado abastecimiento de humedad de agua al suelo en todo momento.

Evapotranspiración de referencia (ET₀)

La noción de ET₀ ha sido establecida para reducir las ambigüedades de interpretación a que da lugar el amplio concepto de evapotranspiración y para relacionarla de forma más directa con los requerimientos de agua de los cultivos (FAO, 2006).

Es similar a la ET_p, ya que igualmente depende exclusivamente de las condiciones climáticas, incluso en algunos estudios son considerados equivalentes (McKenney & Rosenberg, 1993), pero se diferencian en que la ET₀ es aplicada a un cultivo específico, estándar o de referencia, habitualmente gramíneas o alfalfa, de 8 a 15 cm de altura uniforme, de crecimiento activo, que cubre totalmente el suelo y que no se ve sometido a déficit hídrico (Jensen et al., 1990). Es por lo anterior que en los últimos años está reemplazando el termino ET_p.

Evapotranspiración real (ETr)

Pérdida de agua observada en una superficie líquida o sólida saturada, en las condiciones dominantes atmosféricas y de humedad del suelo, por fenómenos de evaporación y de transpiración de las plantas. *ETr* ha sido estimada a través de diversos métodos utilizando balance de agua y balance de energía.

A continuación, se describen algunos de los métodos más comunes para estimar ET

Método Hargreaves

La fórmula de Hargreaves (Hargreaves & Samani, 1985) para evaluar la ET_0 , requiere solamente datos de temperatura y de radiación solar.

La expresión general es la siguiente:

$$ET_0 = 0.0135(t_{med} + 17.78)R_s$$

Ecuación 2.1 método Hargreaves

donde

ET_0	=	evapotranspiración de referencia diaria	mm día ⁻¹
t_{med}	=	temperatura media	°C
R_s	=	radiación solar incidente	mm día ⁻¹

Método Thornthwaite

Thornthwaite desarrolló en 1948 la fórmula empírica, basada en la correlación entre la temperatura media del aire y la tasa de transpiración de las plantas (Llamas, 1993):

$$E_p = 1.6LA \left(\frac{10t}{l} \right)^a$$

Ecuación 2.2 método Thornthwaite

donde:

E_p = evapotranspiración potencial mensual (mm)

LA = factor de corrección para la duración del día, el número de días en el mes y la latitud; da la duración posible media del Sol, en unidades de 30 días iguales de 12 horas cada uno (adimensional)

t = temperatura media mensual del aire (°C)

l = total de los 12 valores mensuales del índice de calor (adimensional)

$$l = \left(\frac{t}{5}\right)^{1.514}$$

Para este método, los únicos datos necesarios para el cálculo son la temperatura media y la latitud de la estación.

Método Penman-Monteith FAO98

Es ampliamente recomendada como el método estándar para estimar la evapotranspiración de referencia ET_0 con validez mundial en los diferentes tipos de clima. Provee los resultados más consistentes para el uso real del agua por los cultivos y ha sido comprobada fehacientemente por organismos especializados, incluyendo la Organización Meteorológica Mundial (Díaz, 2006).

El Método Penman-Monteith FAO98 para estimar ET_0 es derivado de la ecuación original de Penman (1948) y Penman-Monteith (1965). A continuación, la ecuación de Penman-Monteith FAO98:

$$ET_0 = \frac{0.408 \Delta (R_n' - G') + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 u_2)}$$

Ecuación 2.3 método Penman-Monteith FAO98

donde:

ET_0 = evapotranspiración de referencia (mm día⁻¹)

R_n' = radiación neta en la superficie del cultivo (MJ m⁻² día⁻¹)

R_a = radiación extraterrestre (mm día⁻¹)

G' = flujo del calor de suelo (MJ m⁻² día⁻¹)

T = temperatura del aire a 2 m de altura (°C)

u_2 = velocidad del viento a 2 m de altura	(m s ⁻¹)
e_s = presión de vapor de saturación	(kPa)
e_a = presión real de vapor	(kPa)
$e_s - e_a$ = déficit de presión de vapor	(kPa)
Δ = pendiente de la curva de presión de vapor	(kPa °C ⁻¹)
γ = constante psicrométrica	(kPa °C ⁻¹)

Método de balance de energía en la superficie

Permite calcular la ET a partir del balance de energía. Esta aproximación está basada en las condiciones meteorológicas, altitud y latitud de cada sitio (Pandey et al., 2016). La evaporación de agua requiere cantidades relativamente altas de energía, ya sea en la forma de calor sensible o de energía radiante. Por ello, el proceso de evapotranspiración es gobernado por el intercambio de energía en la superficie de la vegetación y limitado por la cantidad de energía disponible (Hemakumara et al., 2003).

Debido a las limitaciones, es posible predecir la ET aplicando el principio de conservación de la energía. La energía que llega a la superficie debe ser igual a la energía que sale de ella (Chow et al., 1994). La ecuación del balance de energía de una superficie considerando solo los flujos verticales (**Figura 2.4**) es la expresada por la *Ecuación 2.4*.

$$R_n = H + G + \lambda LE$$

Ecuación 2.4 balance de energía

donde

R_n = radiación neta	(W m ⁻²)
H = flujo de calor sensible	(W m ⁻²)
G = flujo de calor en el suelo	(W m ⁻²)
λLE = flujo de calor latente	(W m ⁻²)

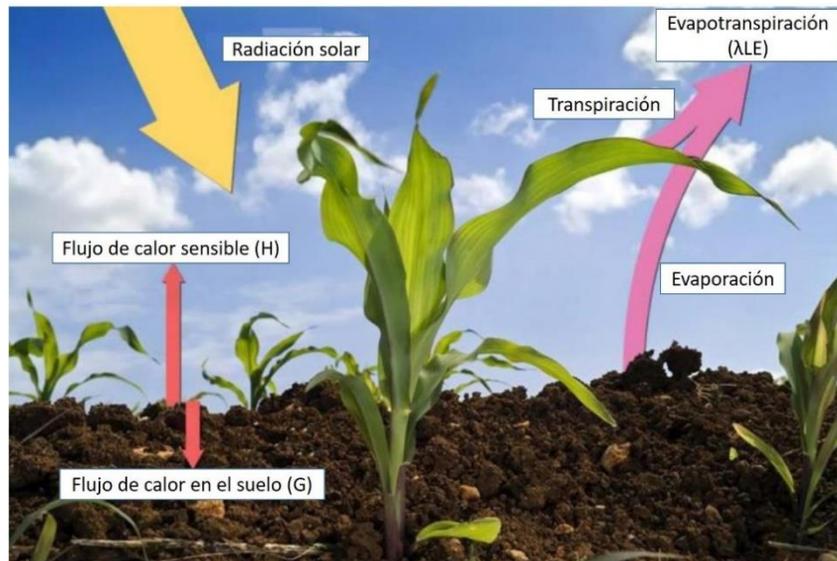


Figura 2.4 Flujo de energía

Entre los métodos más empleados para estimar la ET mediante el uso de imágenes de satélite y la ecuación del balance de energía, está:

- SEBAL (Surface Energy Balance Algorithm for Land).
- METRIC (Mapping Evapotranspiration at High Resolution using Internalized Calibration).
- SSEB (Simplified Surface Energy Balance) (Senay et al., 2007, 2011).

2.6 Teledetección

La teledetección o percepción remota (en inglés Remote Sensing) es una disciplina científica que integra un amplio conjunto de conocimientos y tecnologías empleadas en la observación, el análisis y la interpretación de fenómenos terrestres y planetarios. La teledetección es una técnica que permite obtener información digital de los objetos situados sobre la superficie terrestre, sin necesidad de tener contacto directo con ellos (Chuvieco, 2010). La etimología de la palabra refiere a la adquisición de información sobre un objeto o fenómeno sin hacer contacto físico con el mismo, por tanto contrasta con la observación directa o *in-situ* (Di Leo, 2015). El fenómeno de la teledetección es posible gracias a la interacción de la energía electromagnética con las cubiertas terrestres. Estas tienen un comportamiento reflectivo variable, condicionado tanto por factores externos (ambientales) como por sus propias

características físico químicas en el momento de la toma de la imagen (Gutiérrez & Nieto, 2006).

La teledetección es, actualmente, una de las herramientas más potentes y robustas tanto para la obtención de información espacial de variables urbano-medioambientales, como para la elaboración de mapas (Chuvieco, 2010). Dicha herramienta permite obtener información sobre un objeto, área o fenómeno a través del análisis de los datos adquiridos por un sensor remoto que no se encuentra en contacto con el mismo.

Por otra parte, la base de la teledetección se fundamenta en que cada cuerpo presenta un patrón de energía reflejada propio y diferente, conocido como firma espectral, que lo distingue del resto de materiales. Estas diferencias de comportamiento espectral de cada elemento u objeto son las que permiten su discriminación y mapeo mediante técnicas de análisis y clasificación digital (Ramírez-Juidías et al., 2013).

Se puede estimar la ET a escala local con una precisión aceptable (Allen et al., 2007), sin embargo, estos modelos no pueden ser aplicados a escala regional, a menos que dispongamos de una densa red de estaciones de medida. Además, la mayoría de estos modelos son de difícil aplicación ya que precisan del conocimiento de una gran cantidad de variables y parámetros. Una buena forma de solucionar este problema es hacer uso de las medidas de superficie a través de la teledetección (Sánchez et al., 2005).

Chuvieco (1996), manifiesta que las imágenes obtenidas por los satélites de teledetección ofrecen una perspectiva única de la tierra, sus recursos y el impacto que sobre ella ejercen los seres humanos. Ofrecen una visión global de objetos y detalles de la superficie terrestre y facilitan la comprensión de las relaciones entre ellos, los cuales pueden no verse claramente cuando se observan al ras de tierra.

2.6.1 Aplicaciones de la teledetección

La teledetección se ha aplicado con bastante éxito y sobre todo, con la certeza de que seguirá siendo una técnica altamente importante a corto, mediano y largo plazo, en áreas con aplicación en:

- a) Meteorología
 - Análisis de masas nubosas y su evolución
 - Modelización climática a diferentes escalas
 - Predicción de desastres naturales de origen climático
- b) Agricultura y bosques
 - Determinación del vigor de la vegetación
 - Medición de extensión de cultivos
 - Clasificación de usos de suelo
- c) Cartografía y planeación urbana
 - Cartografía y actualización de mapas
 - Planificación regional
 - Cartografía de redes de transporte
- d) Recursos hidrográficos
 - Medida de modelos de sedimentación y turbidez
 - Delineación de campos irrigados
 - Cartografía de inundaciones
- e) Medio ambiente
 - Estimación de modelos de escorrentías y erosión
 - Control medioambiental de actividades humanas
 - Seguimiento de incendios forestales

2.6.2 Satélites

Existen muchos satélites orbitando la tierra para distintos objetivos: telecomunicaciones, geolocalización, meteorología, militares, monitoreo y de investigación. Estos satélites portan lo que se denomina, carga útil, que no es otra cosa más que los dispositivos sensores y los suministros para realizar lo que se le denomina como “misión”; que es la forma de referirse al objetivo para el que fueron construidos y puestos en órbita éstos satélites (Ariza, 2013).

En la **Tabla 2.1** se mencionan algunos de los satélites y los sensores más empleados en el monitoreo de fenómenos de superficie (Pohl & Van Genderen, 2017).

Tabla 2.1 Ejemplos de satélites utilizados en percepción remota y tipo de sensor

Satélite	Tipo de sensor
TERRA Y AQUA (E.U.A)	ASTER, CERES, MISR, MODIS, MOPITT
ERS (Europa)	RA, ATSR, GOME, MWR, SAR, WS, PRARE
LANDSAT 5 (E.U.A)	MSS, TM
TERRASAR X	LCT, TOR
LANDSAT 7 (E.U.A)	ETM+
NOAA (E.U.A)	AVHRR
LANDSAT 8 (E.U.A)	OLI, TIRS
IKONOS (E.U.A)	MS, PAN
SPOT 1-5 (Europa)	HVR, VEGETATION, HRV-IR
ENVISAT-1 (Europa)	MERIS
Sentinel-2a (Europa)	MSI
ALOS (Japón)	AVNIR-2

Los satélites son puestos en distintas órbitas, las hay elípticas (HEO) cuyo radio es de más de 36,000 km, geoestacionarias (GEO) cuyo radio es de aproximadamente 36,000 km, medias (MEO) cuyo radio es de hasta 9,600 km y bajas (LEO), entre 600 km y 1600 km, siendo este tipo de órbita la usada en percepción remota. En la **Figura 2.5** se muestra una ilustración de las orbitas satelitales.

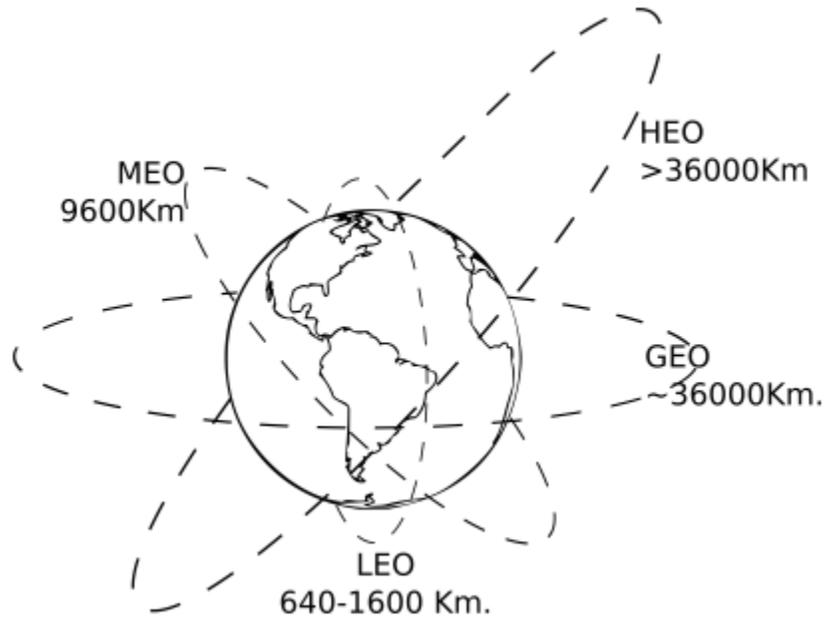


Figura 2.5 Tipos de órbitas satelitales (MANRIQUEZ, 2018)

2.6.3 Sensores

Son equipos capaces de coleccionar energía proveniente de los objetos, convertirla en una señal posible de ser registrada, para presentarla en una forma adecuada, que permita extraerle información (Ramírez-Juidías et al., 2013).

Los sensores que capturan las imágenes en teledetección pueden ir montados en aviones o en satélites. La teledetección desde aviones tiene como ventaja ser económico con respecto al satélite, además de que se puede planificar la ruta de vuelo, mientras que con el uso de satélites el trayecto y periodo de revisado es fijo (Kincade, 2016). La ventaja que presentan los sensores montados en satélite es que pueden dar constancia en la adquisición de imágenes, barridos fotográficos más amplios y menor costo de mantenimiento ya que es el espacio no hay partículas que degraden al sistema sensor.

Otra cualidad de los sistemas satelitales es que se suelen implementar como “constelación de satélites” que es el hecho de enviar varios satélites en una misma órbita, aumentando la periodicidad de la captura de las imágenes. Por estos motivos la percepción remota desde satélites brinda la capacidad de generar técnicas y algoritmos para procesar las imágenes capturadas y así lograr dar un mayor valor a la información obtenida remotamente (Pohl & Van Genderen, 2017).

De Jong et al., (2004) menciona que una de las formas habituales de clasificar los sensores remotos considera un procedimiento para recibir energía procedente de la superficie terrestre; en tal sentido, pueden ser clasificados de la siguiente manera:

- Sensores pasivos: No tienen su propia fuente de radiación.

Son sensibles solo a la radiación de origen natural, generalmente la luz solar reflejada o la energía emitida por un objeto terrenal.

- Sensores activos: Tienen una fuente de radiación incorporada.

La radiación se puede grabar en forma analógica, la fotografía aérea es un ejemplo, o la radiación se puede almacenar en una disposición digital, un conjunto de valores de señal en un dispositivo magnético CD-ROM o DVD.

A través del uso de satélites, ahora tenemos un programa continuo de adquisición de datos para el mundo entero con un marco de tiempo que va desde un par de semanas hasta algunas horas (Eastman, 2012).

2.6.4 Espectro electromagnético

Según Campbell & Wynne (2011), la resolución espectral describe la capacidad del sensor para definir pequeños intervalos de longitudes de onda. En general se refieren al ancho de las bandas de longitud de onda a lo largo del espectro electromagnético (*Figura 2.6*) que el sensor es capaz de captar y diferenciar.

Elachi & Van Zyl (2006), indican que el espectro electromagnético se refiere a la representación de los diferentes tipos de energía de radiación y sus correspondientes longitudes de onda. Hay usualmente 7 subdivisiones:

- Ondas de radio: Esta región es utilizada por sensores de radio activos, tales como radares de imagen, altímetros y en menor medida radiómetros pasivos.

- Microondas:

Chuvieco (2002), son radiaciones electromagnéticas, cuyas longitudes de onda son mayores al milímetro (mm) y resulta de gran interés por ser transparente ante la cubierta nubosa y a las gotas de agua. Esta región es utilizada por radiómetros/espectrómetros de microondas y sistemas de radar.

- **Infrarrojo:**
Chuvieco (2002), forma parte del espectro electromagnético cuyo rango oscila entre 0.7 hasta 14 μm . Esta región se subdivide a la vez en:
 - Infrarrojo cercano: abarca longitudes de onda entre 0.7-13 μm . Se aplica para discriminar masas vegetales y concentración de humedad.
 - Infrarrojo medio: abarca longitudes de onda entre 1.3-8 μm . Se utiliza para estimar contenido de humedad en la vegetación y detectar focos de elevada temperatura.
 - Infrarrojo lejano o térmico: abarca longitudes de onda entre 8-14 μm . Se detecta el calor proveniente de la mayor parte de las cubiertas terrestres.
- **Espectro visible:**
Comprende longitudes entre 0.4-0.7 μm y recibe su nombre, por ser la única radiación electromagnética perceptible por el ojo humano; dividiéndose en tres bandas
 - Azul (0.4-0.5 μm)
 - Verde (0.5-0.6 μm)
 - Rojo (0.6-0.7 μm)

Además, estas bandas son acompañadas por una gama de tonalidades coloreadas.
- **Rayos ultravioleta:**
Radiación electromagnética cuya longitud de onda es menor que cualquiera de las del espectro visible entre 10 – 400 nm. Esta radiación es parte integrante de los rayos solares y produce varios efectos en la salud al ser una radiación entre no-ionizante e ionizante.
- **Rayos X:**
Radiación electromagnética, invisible para el ojo humano, capaz de atravesar cuerpos opacos y de imprimir las películas fotográficas. Los actuales sistemas digitales permiten la obtención y visualización de la imagen radiográfica directamente en una computadora (ordenador) sin necesidad de imprimirla. La longitud de onda está entre 10 a 0,01 nanómetros, 0.03-3 nm
- **Rayos gama:**

Pueden causar grave daño al núcleo de las células, por lo cual se usan para esterilizar equipos médicos y alimentos

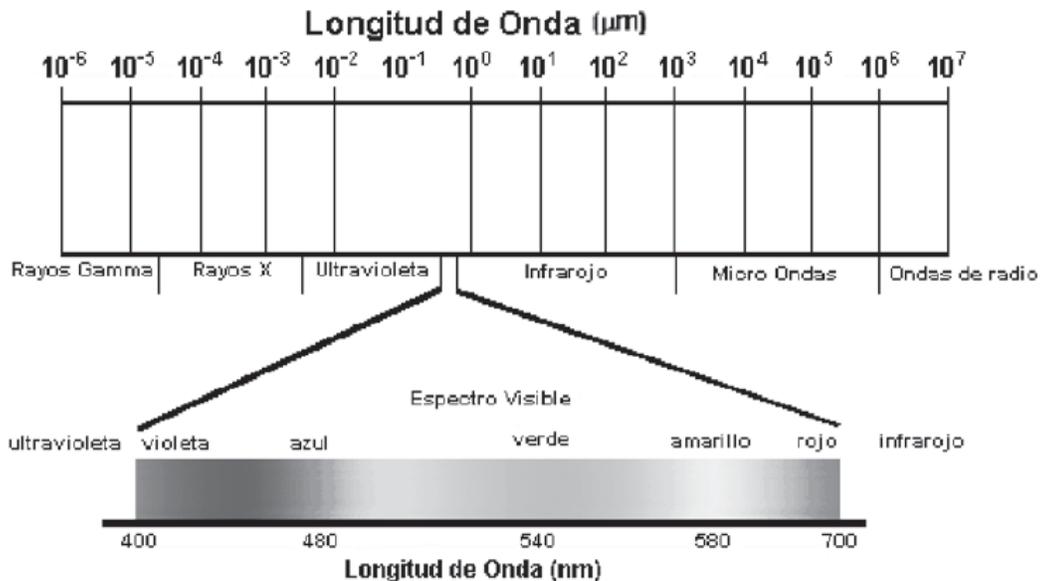


Figura 2.6 Espectro electromagnético (Sanjurjo & Kalliola, 2004).

2.6.5 Mecanismo para la obtención de datos de satélite

Chuvieco (2002), menciona que los elementos involucrados en la obtención de los datos satelitales son:

- Fuente de energía
- Objeto
- Sensor
- Sistema receptor
- Servidor
- Procesamiento de imágenes
- Usuario final

En consecuencia, la energía electromagnética es el elemento que interrelaciona al objeto y sensor, siendo las más importantes, aquella producida por la reflexión, que se deriva directamente de la luz solar, principal fuente de energía del planeta (**Figura 2.7**).

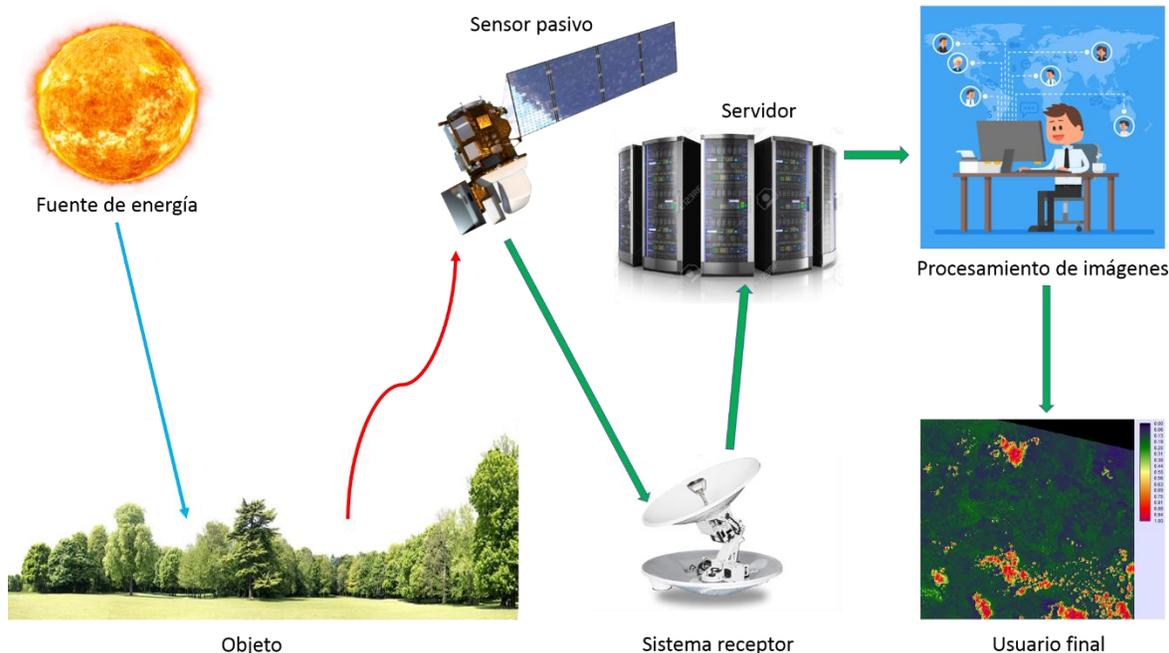


Figura 2.7 Mecanismos para obtención de datos de satélite

2.6.6 Landsat

LAND: Tierra, SAT: Satélite. Se trata de una serie de satélites que orbitan alrededor de la tierra proporcionando la adquisición repetida de datos multiespectrales de moderada resolución de la superficie de la tierra a nivel global. Las imágenes Landsat representan un recurso significativo en el estudio y desarrollo de las diferentes áreas profesionales como geología, agricultura, educación, estudio del cambio climático, recursos hídricos y conservación de biodiversidad (Zanter, 2016).

Antes de 1972, la idea de utilizar datos de satélite para la vigilancia terrestre, la cartografía a la exploración era un concepto visionario. Hecho que da origen al programa Landsat, el cual se constituye en una serie de misiones de observación de la tierra por satélite gestionadas conjuntamente por la NASA y el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS) (Ariza, 2013).

El USGS, (2016) menciona que los satélites Landsat han adquirido continuamente imágenes basadas en el espacio de la superficie terrestre de la Tierra, proporcionando datos ininterrumpidos (**Tabla 2.2**) para ayudar a los administradores de la tierra y a los responsables

políticos a tomar decisiones informadas sobre nuestros recursos naturales y el medio ambiente.

Tabla 2.2 Historial misiones Landsat

Misión	Fecha de operación
Landsat 1	23 de julio de 1972 - enero de 1978
Landsat 2	22 de enero de 1975 - 27 de julio de 1983
Landsat 3	5 de marzo de 1978 - 7 de septiembre de 1983
Landsat 4	16 de julio de 1982 - diciembre 1993
Landsat 5	1 de marzo de 1984 - 5 de junio de 2013
Landsat 6	5 de octubre de 1993 – no alcanzó órbita
Landsat 7	15 de abril de 1999 – sigue en operación
Landsat 9	Próximamente; marzo de 2021

Durante más de 40 años, Landsat ha recopilado información espectral de la superficie de la Tierra, creando un archivo histórico sin igual (**Figura 2.8**) en calidad, detalle, cobertura y longitud (NASA, 2020).

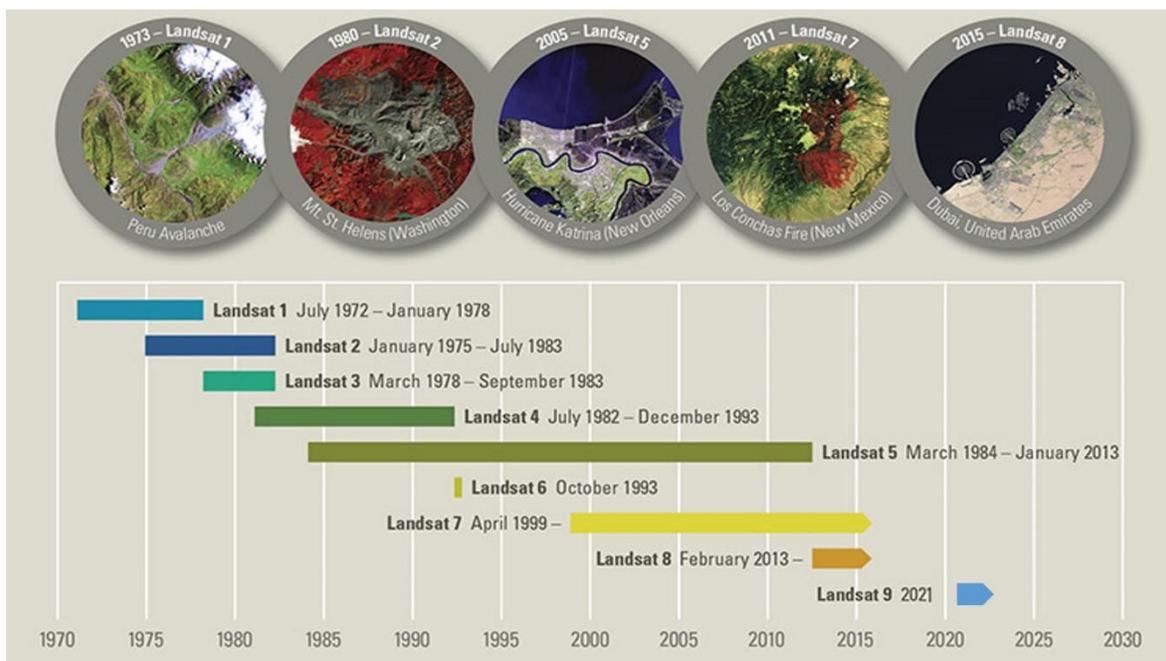


Figura 2.8 Historia satélites Landsat

Landsat 8

Landsat 8 (conocido por primera vez como la Misión de Continuidad de Datos Landsat) se lanzó el 11 de febrero de 2013 desde la Base Vandenberg de la Fuerza Aérea, California, en un cohete Atlas-V. El satélite lleva el generador de imágenes terrestres operacionales y el sensor infrarrojo térmico (USGS, 2016).

Ha contribuido a un registro multiespectral ininterrumpido de las superficies terrestres, además se ha puesto especial énfasis en actualizar periódicamente el archivo de datos global, manteniendo una calibración precisa del instrumento (Zanter, 2016).

El satélite Landsat 8 con órbita alrededor de la Tierra en una órbita sincrónica al Sol, casi polar, a una altitud de 705 km (438 millas), inclinada a 98.2 grados, y rodea la Tierra cada 99 minutos. El satélite tiene un ciclo de repetición de 16 días con un tiempo de cruce ecuatorial: 10:00 am +/- 15 minutos (USGS, 2016).

Los productos de datos creados a partir de más de 1.3 millones de escenas Landsat 8 OLI / TIRS están disponibles para descargar desde EarthExplorer, GloVis y LandsatLook Viewer.

Sensor OLI

El sensor *Operational Land Imager* (OLI) avanza en la tecnología de sensores Landsat, el cual utiliza un sensor compuesto por una serie de baterías, con más de 7000 detectores, lo cual hace un instrumento sensible proporcionando una mejor información de la superficie terrestre (Ariza, 2013).

El sensor OLI recopila datos de imagen para 9 bandas espectrales de onda corta en una franja de 190 km con una resolución espacial de 30 m para todas las bandas, excepto la banda Pancromática de 15 m (*Tabla 2.3*).

Tabla 2.3 Sensor Operational Land Imager (OLI)

Operational Land Imager (OLI)		
<i>Sensor</i>	<i>Longitud de onda</i>	<i>Resolución espacial (m)</i>
Banda 1 aerosol costero	0.43 - 0.45	30 m
Banda 2 Azul	0.45 - 0.51	30 m
Banda 3 Verde	0.53 – 0.59	30 m

Banda 4 Rojo	0.64 – 0.67	30 m
Banda 5 Infrarrojo cercano	0.85 – 0.88	30 m
Banda 6 SWIR 1	1.57 – 1.65	30 m
Banda 7 SWIR 2	2.11 – 2.29	30 m
Banda 8 Pancromático	0.50 – 0.68	15 m
Banda 9 Cirrus	1.36 – 1.38	30 m

Sensor TIRS

Todo en la Tierra emite radiación térmica infrarroja, termino comúnmente conocido como calor. La física menciona que la cantidad de la radiación emitida es proporcional a la temperatura del objeto (Ariza, 2013).

El *Thermal Infrared Sensor* (TIRS) recopila datos de imagen para dos bandas térmicas (**Tabla 2.4**) con una resolución espacial de 100 m en una franja de 190 km (Zanter, 2016).

Tabla 2.4 Sensor Thermal Infrared Sensor (TIRS)

Thermal Infrared Sensor (TIRS)		
<i>Sensor</i>	<i>Longitud de onda</i>	<i>Resolución espacial (m)</i>
Banda 10 TIRS 1	10.60 – 11.19	100 m
Banda 11 TIRS 2	11.50 – 12.51	100 m

3 METODOLOGÍA

Para implementar los objetivos planteados en el presente trabajo se estructuró la metodología (*Figura 3.1*) en tres etapas:

- En la primera etapa se delimitó la zona de estudio y se integran las bases de datos de flujos turbulentos (radiación neta y ET), meteorológica y satelital necesaria para cubrir la zona de estudio.
- En la segunda etapa se integró un algoritmo para estimar la evapotranspiración real a partir de datos meteorológicos y satelitales
- En la tercera etapa, se validó la temperatura de superficie, radiación neta y evapotranspiración real con la base de datos de flujos turbulentos del área de estudio, para finalmente ser automatizada.

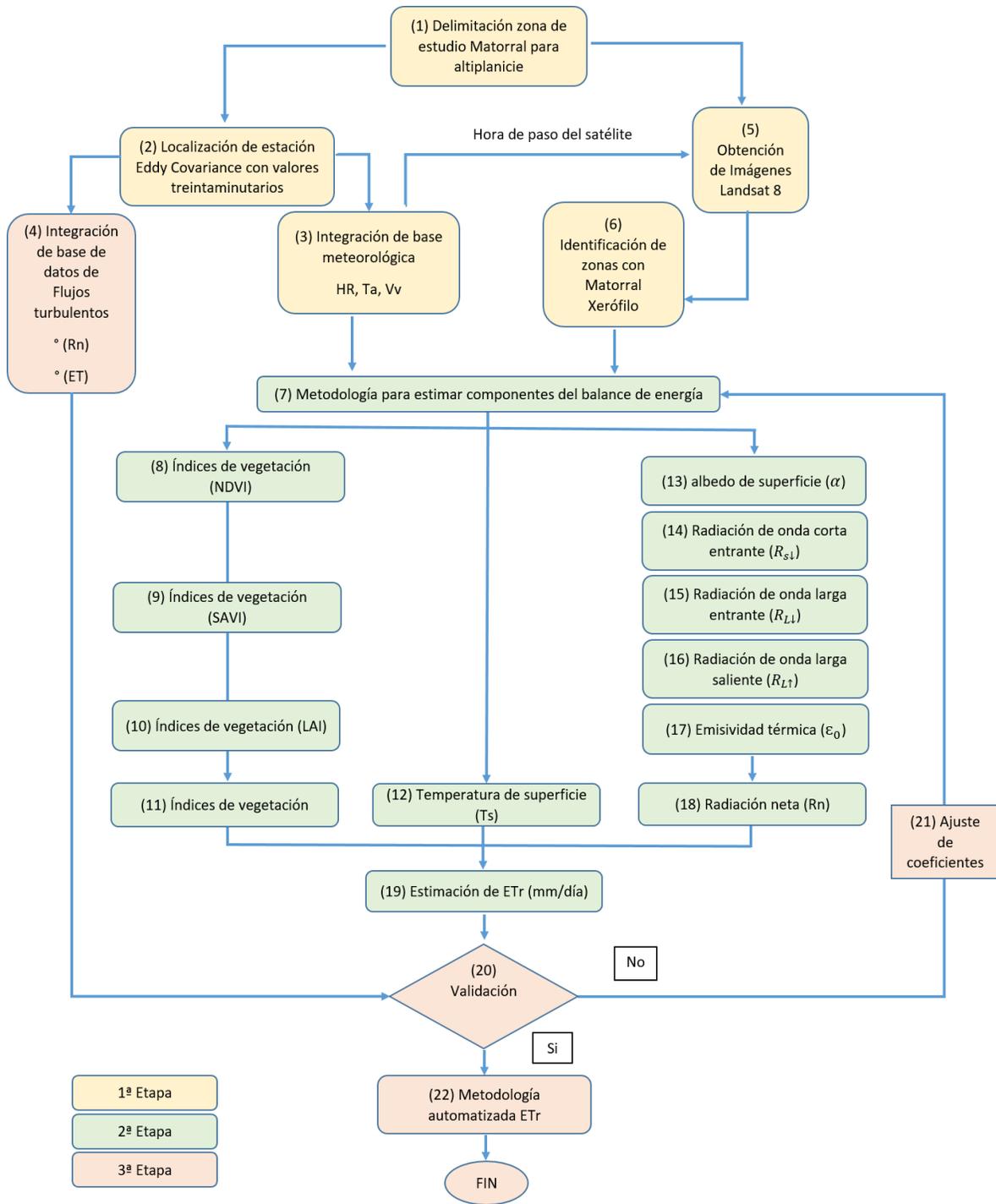


Figura 3.1 Estimación y validación de la Evapotranspiración para matorral xerófilo mediante teledetección

3.1 Área de estudio

Para definir el área de estudio se toma en cuenta los siguientes parámetros:

1. Estación Bernal
2. Estado de Querétaro
3. Imagen Landsat 8
4. Zona semiárida (matorral)

- Estación Bernal

La estación Bernal tiene su origen derivado del consorcio MexFlux el cual está integrado por un grupo de investigadores mexicanos de diferentes instituciones que establecieron una red regional con el objetivo de generar información científica sobre los ciclos biogeoquímicos en los diferentes ecosistemas del país y con ello aportar datos necesarios para el diseño de estrategias de mitigación y adaptación ante el cambio climático.

Para entender el comportamiento de los ecosistemas, es importante contar con mediciones de flujos de carbono y flujos de energía a una escala espacial y temporal más amplia. Por esta razón, el método más usado para la medición de los flujos entre la superficie y la atmósfera (CO_2 y el intercambio de energía y masa) a nivel ecosistema es el método de covarianza de vórtices (*Eddy covariance*, en inglés).

A continuación, se muestra en la **Figura 3.2** los sitios donde se han instalado las estaciones analizadoras de gases de 5 tipos Li-7500 A, Li-Cor, Lincoln, NE, EUA que son capaces de obtener datos de flujos de CO_2 y flujos de energía bajo el método covarianza de vórtices.

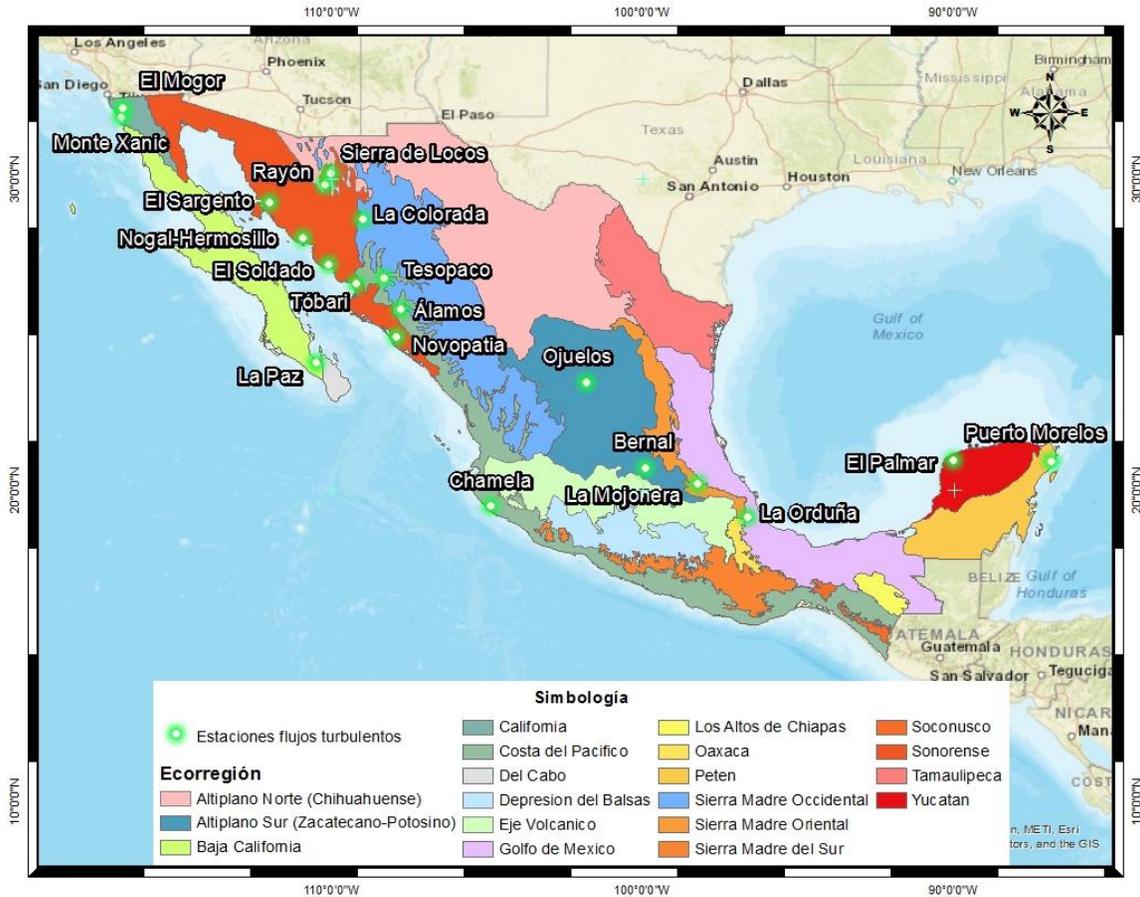


Figura 3.2 Localización de los sitios MexFlux en México para monitoreo de flujos de CO₂ y energía (Estaciones flujos turbulentos).

La estación Bernal (*Figuras 3.3-3.5*), cuenta con un analizador de gases del tipo Li-7500 A, que permite medir el intercambio de los flujos de CO₂ y flujo de energía para la obtención parámetros meteorológicos entre la superficie y la atmósfera. A fin de monitorear los flujos de energía este sistema requiere la instalación de una torre con sensores micrometeorológicos a una altura adecuada, para asegurar la representatividad de la superficie en la vertical y horizontal (Footprint). Es decir, la altura y posición de la torre depende de la altura de la vegetación, la dirección y velocidad predominante del viento en la zona (Vargas et al., 2013). Este sistema además de medir los flujos de CO₂ y energía, permite medir variables meteorológicas como precipitación, temperatura, velocidad y dirección del viento, humedad relativa, radiación neta, entre otros.

Ficha técnica de estación Bernal



Figura 3.3 Instalación de estación Bernal



Figura 3.4 Estación Bernal en operación



Figura 3.5 Instrumentación de tres placas para medir flujo de calor en el suelo (suelo desnudo, cubierto y semicubierto)

Tabla 3.1 Ficha técnica de estación de flujos turbulentos

Sensor	Variable	Rango	Precisión	Instalación
LI-7200RS	Analizador de gas (CO ₂ y vapor de agua)	0 a 60 dopa de mol ⁻¹	1%	1.5-2.0 m altura de vegetación, con un área de alcance de 200 m en todas direcciones. Orientado hacia los vientos dominantes en la región
NR-Lite2 radiometer	Radiación neta	±2000 W m ⁻²	10 μV W-1 m ²	Orientado hacia el sur, sin obstáculos que le generen sombra.
HFP01SC	Flujo de calor en el suelo	-2000 a +2000 W/m ²	60 x 10 ⁻⁶ V/(W/m ²)	80 mm profundidad en el suelo en diferentes grados de coberturas
TE525-L rain gauge 6 in.	Lluvia		±1%	Altura de 1.2 m; a 3 m de distancia de la torre
HMP155A	Temperatura del aire	-20 a 70 °C	±0.25 °C	
	Humedad relativa	0-95%		
	Presión	20 a 110 kPa	±0.4 kPa	
Sistema SmartFlux®	Genera resultados de flujo totalmente procesados en tiempo real, utilizando datos del analizador de gases LI-COR y anemómetro sónico			

La estación Bernal, se ubica en el municipio de Ezequiel Montes, estado de Querétaro (*Figura 3.6*) a 2050 msnm, con una precipitación media anual de 550 mm y una temperatura media anual de 16.7°C (Balbuena et al., 2019). Específicamente la estación se encuentra instalada en una zona vegetación secundaria de matorral xerófilo y agostadero, los componentes presentan una altura promedio de 4 m y en general se trata de herbáceas y arbustos. En el año 2017 se instaló y presenta un registro continuo cada 30 minutos, dicha estación es administrada y soportada por la Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ).

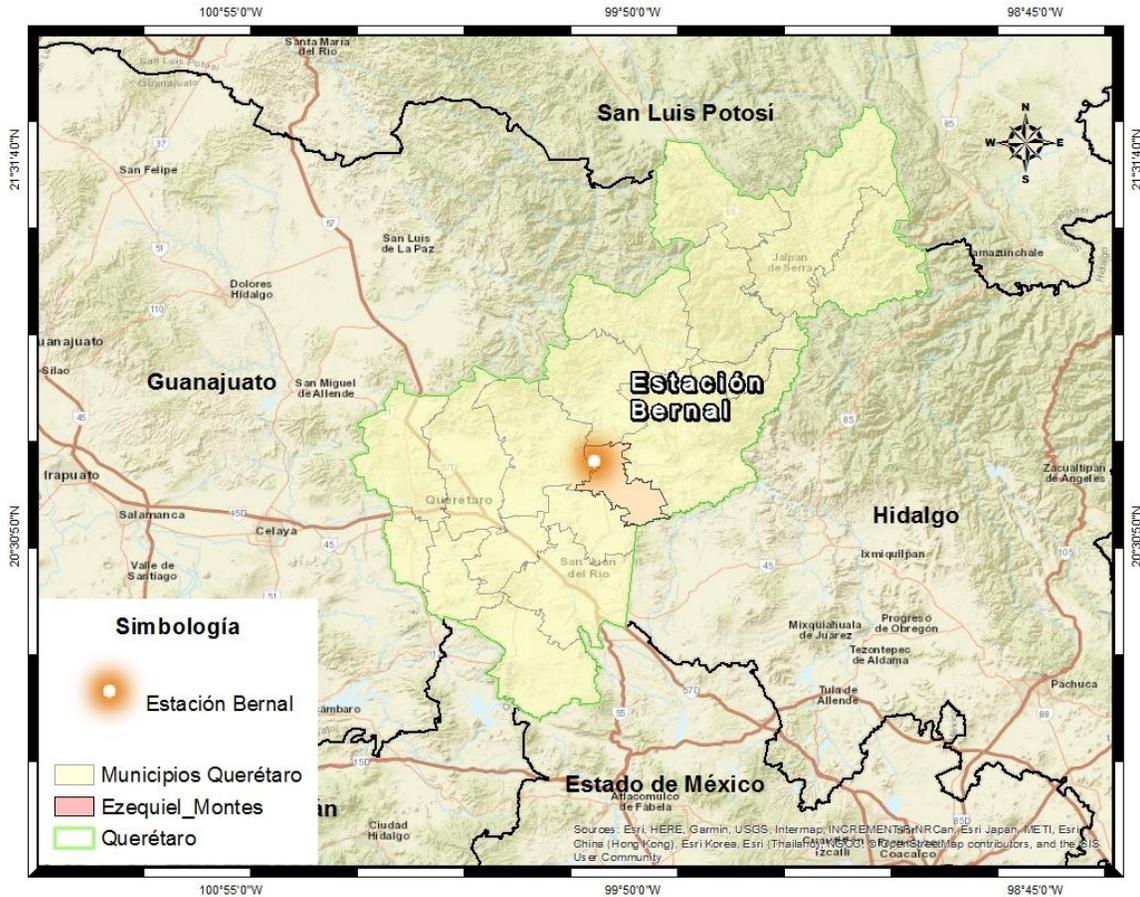


Figura 3.6 Ubicación estación Bernal

- Querétaro

El estado de Querétaro es una de las 32 entidades federativas de la República Mexicana, se localiza en la región central de la nación; con una superficie de 11 690.58 km², representa el 0.6% del territorio nacional. La división política de Querétaro se compone de 18 municipios (*Figura 3.7*). Su capital es la ciudad de Santiago de Querétaro (INEGI, 1999). Sus coordenadas máximas 21°41'21", mínimas al 19°59'55" de latitud norte; coordenadas máximas 100°36'13", mínimas 99°01'56", de longitud oeste (INEGI, 2017). Colinda al norte con Guanajuato y San Luis Potosí; al este con San Luis Potosí e Hidalgo; al sur con Hidalgo, México y Michoacán de Ocampo; al oeste con Guanajuato (INEGI, 2014).

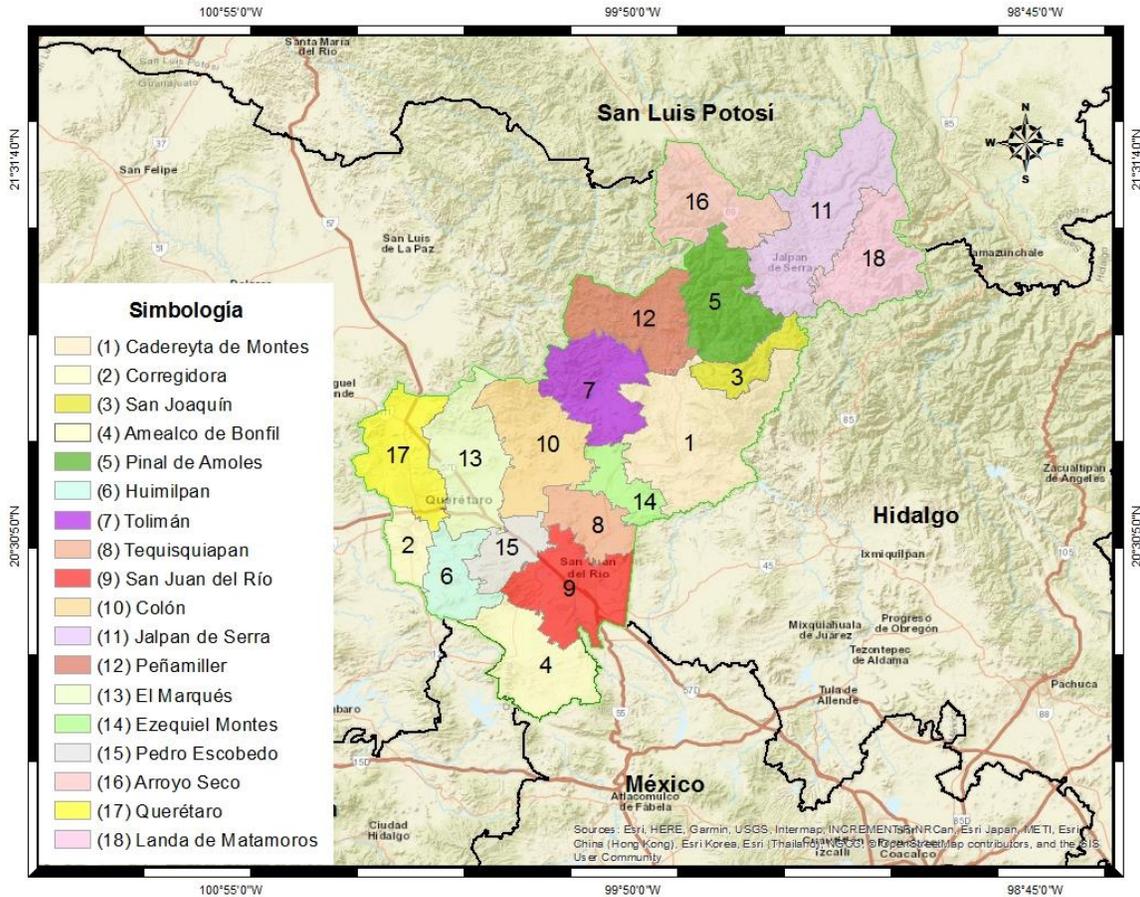


Figura 3.7 Ubicación municipios del estado de Querétaro

- Imagen Landsat 8

La imagen Landsat 8 que abarca la estación Bernal es la correspondiente con Path 27 y Row 46. Para definir el área de estudio se ajustó a la cobertura de la imagen Landsat 8, y localización de la estación Bernal, cubriendo la zona sur del estado de Querétaro (**Figura 3.8**). Con una superficie total de 7 553.78 km², abarca 12 municipios: Cadereyta, Corregidora, Amealco, Huimilpan, Tolimán, Tequisquiapan, San Juan del Río, Colón, El Marqués, Ezequiel Montes, Pedro Escobedo, Querétaro, y parte de San Joaquín y Peñamiller.

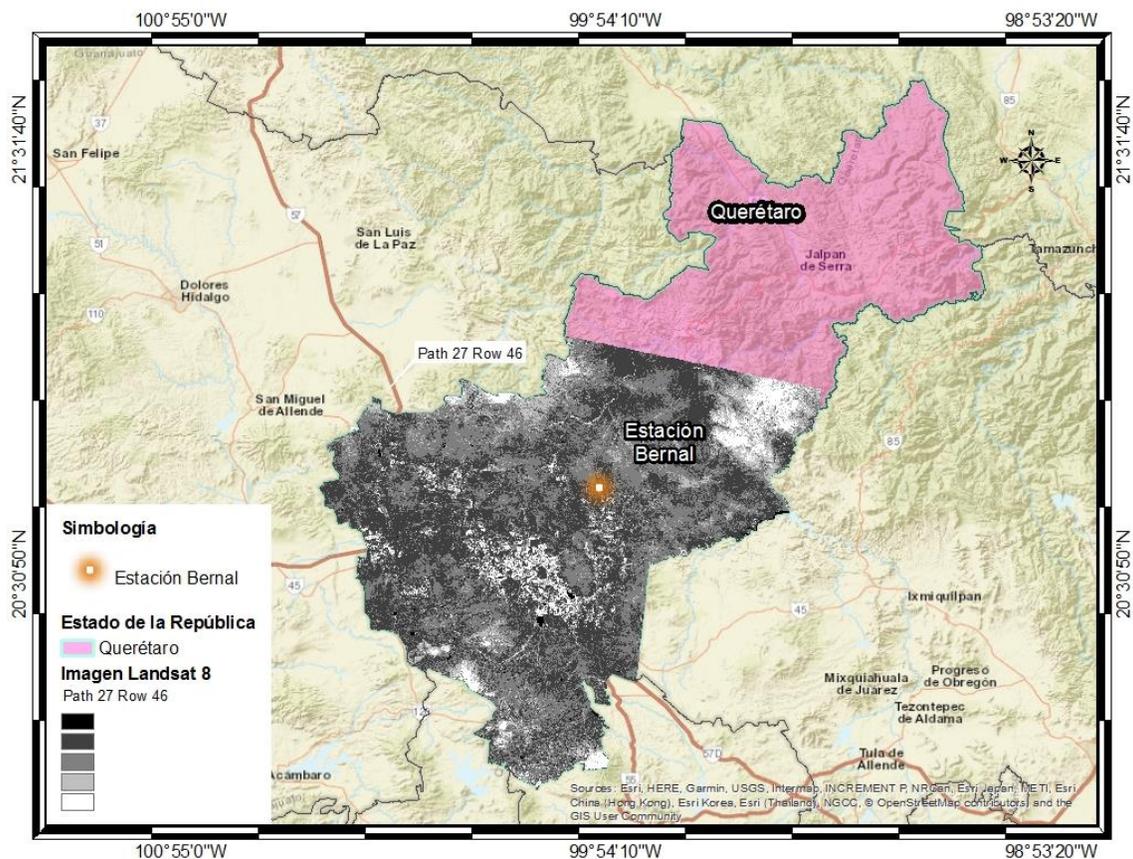


Figura 3.8 Área de estudio: localización de estación Bernal y cobertura de imagen Landsat 8

Clima

En cuanto a la clasificación del clima, podemos mencionar la propuesta por Köppen. Este científico clasificó el clima de la Tierra teniendo en cuenta dos variables principales, la temperatura del aire y la precipitación de las regiones del mundo (Cardoso et al., 2015).

García (2004), ajustó dicha clasificación a México, con el objetivo de que exista correspondencia con las variables particulares, pero importantes en la República Mexicana.

Basado en la clasificación de García (2004), la zona de estudio cuenta con 9 tipos de clima (*Figura 3.9*). De estos tipos, se agrupan cinco grandes grupos de clima (árido, semiárido, semicálido, semifrío, templado) con la finalidad de identificar el nivel de importancia con base en la cantidad de superficie que abarca dentro de la zona de estudio (*Tabla 3.2*), en la que predomina el clima semicálido.

Los climas predominantes en la zona de estudio son el semiárido que ocupa el 67%, el templado en el 30.92%, el árido en el 1.97%, el semicálido en el 0.06% y el semifrío en el 0.03% del territorio. La temperatura promedio anual es de 19°C, la temperatura promedio del año más frío fue de 17°C y la del año más caluroso de 19.7°C (INEGI, 2017).

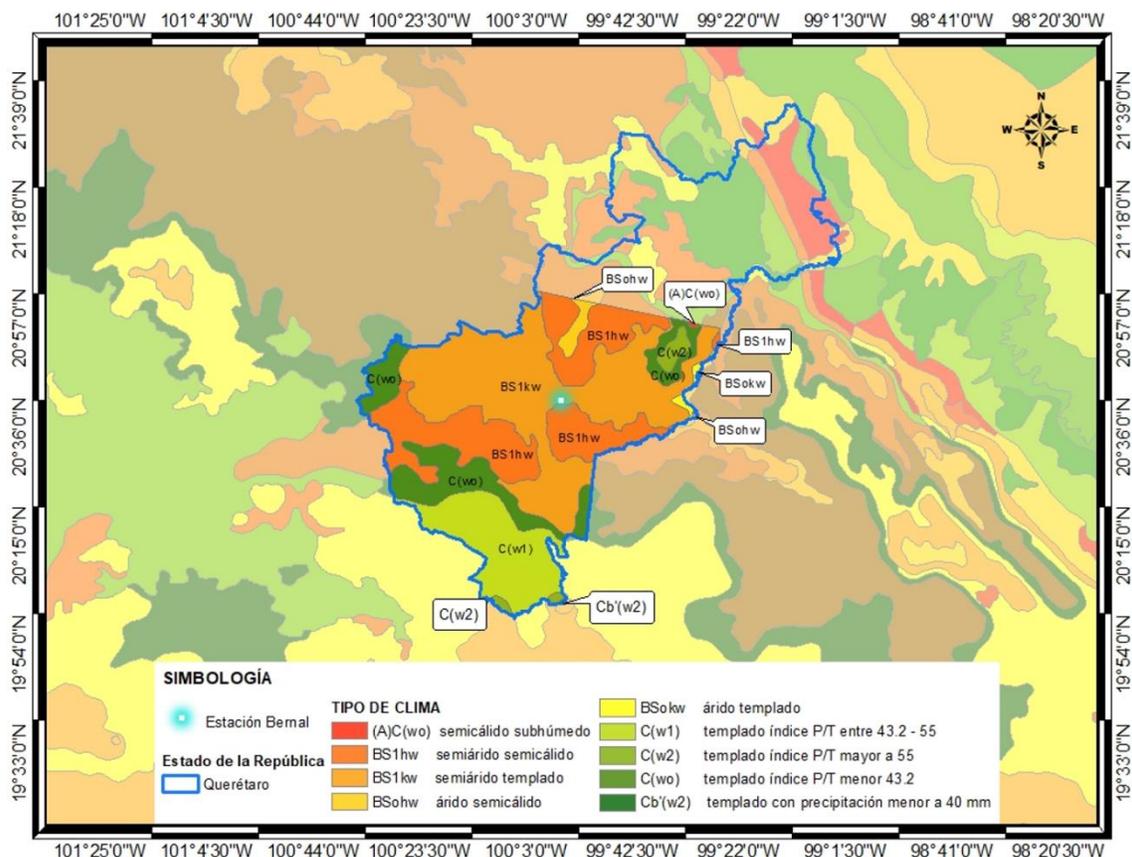


Figura 3.9 Climas de la zona de estudio

Tabla 3.2 Importancia de los climas de la zona de estudio con base en superficie que abarca

Tipo de clima	Superficie km ²
semiárido	5 065.05
templado	2 336.20
árido	144.58
semicálido	5.09
semifrío	2.86

Vegetación

Según Rzedowski, (1981), el estado de Querétaro pertenece a la provincia florística de la altiplanicie, que se incluye en la región Xerofítica mexicana, y la vegetación predominante es el matorral xerófito, con zonas de pastizal y bosque espinoso.

Predominan los matorrales que se ubican en la parte central del estado; le siguen en importancia los bosques de coníferas y encinos que se ubican en las zonas altas del norte y el bosque tropical caducifolio en las partes bajas del sur de la entidad. Los pastizales se localizan en las áreas cercanas a los bosques y selvas (*Figura 3.10*).

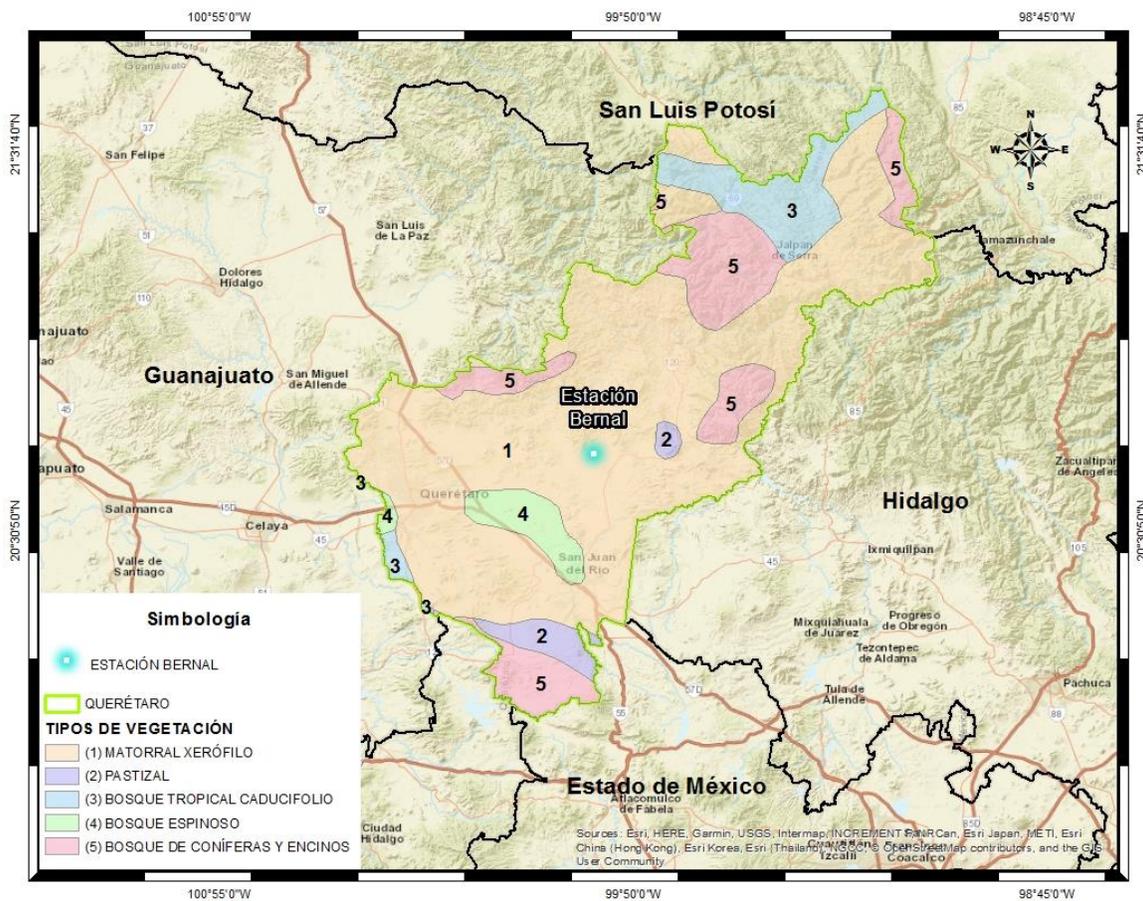


Figura 3.10 Vegetación potencial de la zona de estudio (Rzedowski, 1990)

3.2 Base de datos satelital

La zona de estudio comprende un área de 7 553.78 km², área que es cubierta por una escena Landsat 8 (180 km x 180 km), donde se localiza la estación Bernal, y que de acuerdo con (Allen et al., 2007) es suficiente para estimar ET para dicha escena. Para la construcción de

base de datos satelital, se descargaron imágenes del satélite Landsat 8, con Path 27 y Row 46 de la base del USGS (United States Geological Survey) que se encuentra a disposición del público en <https://earthexplorer.usgs.gov/>.

Se conformó una base satelital de 14 escenas para los años 2017 y 2018, si bien es posible obtener una imagen cada 16 días, para este estudio se descartaron escenas con la menor nubosidad posible a fin de evitar errores en las estimaciones realizadas. En la **Tabla 3.3** se muestran las fechas de imágenes empleadas en este estudio.

Tabla 3.3. Fecha de imágenes Landsat 8 disponibles para la zona de estudio (path 27 y Row 46)

Landsat 8 - 2017	día juliano	Landsat 8 - 2018	día juliano
4 de abril	94	17 de enero	17
20 de abril	110	2 de febrero	33
6 de mayo	126	18 de febrero	49
22 de mayo	142	22 de marzo	81
29 de octubre	302	7 de abril	97
30 de noviembre	334	23 de abril	113
		9 de mayo	129
		25 de mayo	145

Nota: hora del paso del satélite (17:05:00 UTC \pm 2 min; 11:05:00 hora local)

3.3 Base de datos Eddy covariance

La estación Bernal cuenta con sistema Eddy covariance de LI-COR, dicho sistema calcula los resultados en tiempo real con el software EddyPro®. De tal forma que los registros se pueden consultar en línea, apoyando el cálculo, verificación y análisis de los datos. Asimismo, cuenta con el sistema SmartFlux®, componente que permite el procesamiento y sincronización de geoposicionamiento en el sitio. Permite la generación de flujos totalmente procesados y en tiempo real; a partir de los datos del analizador de gases LI-COR y el anemómetro sónico, a partir del método Eddy covariance.

Los datos resultantes se presentan en formato de texto que se importa fácilmente en hojas de cálculo. La **Tabla 3.4** presenta información de la base de datos con registros y parámetros necesarios que son de utilidad para obtener el valor de los componentes de flujo de energía con base en la disponibilidad y calidad de las imágenes Landsat 8 obtenidas de USGS.

Tabla 3.4 Base de datos meteorológicos correspondientes a las fechas de imágenes de satélite.

Fecha	Hora	DOY	temp_aire	vel. viento	hum_rel
<i>dd-mm-yyyy</i>	<i>HH:MM:SS</i>	<i>día secuencial</i>	<i>K</i>	<i>m s⁻¹</i>	<i>%</i>
04/04/2017	11:00:00	94	296.95	4.15	9.38
20/04/2017	11:00:00	110	294.91	1.32	17.48
06/05/2017	11:00:00	126	297.70	1.62	24.59
22/05/2017	11:00:00	142	298.47	1.59	39.44
29/10/2017	11:00:00	302	291.83	2.66	60.93
30/11/2017	11:00:00	334	288.69	1.79	50.87
17/01/2018	11:00:00	17	284.81	3.56	55.14
02/02/2018	11:00:00	33	291.59	4.37	36.98
18/02/2018	11:00:00	49	291.10	0.98	46.51
22/03/2018	11:00:00	81	293.36	0.96	46.73
07/04/2018	11:00:00	97	294.86	4.47	24.29
23/04/2018	11:00:00	113	295.06	1.40	49.18
09/05/2018	11:00:00	129	293.70	1.11	32.69
25/05/2018	11:00:00	145	294.78	3.43	46.33

donde

temp_aire = temperatura del aire

vel. viento = velocidad del viento

hum_rel = humedad relativa

En la **Tabla 3.5** se puede observar la información de la base de datos con registros y parámetros necesarios que son de utilidad para validar los resultados con los obtenidos mediante la metodología empleada en el presente trabajo.

Tabla 3.5 Base de datos de los principales parámetros de la estación Bernal

Fecha	Hora	Ts	Rn	ET
<i>dd-mm-yyyy</i>	<i>HH:MM:SS</i>	<i>K</i>	<i>W m⁻²</i>	<i>mm día⁻¹</i>
04/04/2017	11:00:00	298.40	NAN	NAN
20/04/2017	11:00:00	296.28	NAN	NAN
06/05/2017	11:00:00	302.03	NAN	NAN
22/05/2017	11:00:00	303.06	460.61	6.81
29/10/2017	11:00:00	297.29	519.18	5.09
30/11/2017	11:00:00	292.77	459.91	4.24
17/01/2018	11:00:00	289.52	408.59	4.24
02/02/2018	11:00:00	293.20	416.29	4.95
18/02/2018	11:00:00	296.11	467.68	5.54
22/03/2018	11:00:00	300.79	511.38	6.49

07/04/2018	11:00:00	299.86	537.17	7.44
23/04/2018	11:00:00	300.49	534.28	7.03
09/05/2018	11:00:00	295.66	610.20	8.28
25/05/2018	11:00:00	302.90	561.59	8.08

donde

Ts = Temperatura de superficie

Rn = Radiación neta

ET = Evapotranspiración

3.4 Estimación de Evapotranspiración (ET).

Este proceso se logra en una serie de pasos para calcular los elementos que ayudan a completar el componente (ET).

De acuerdo con Wang et al., (2007) la ET se puede estimar integrando componentes como la radiación neta, condición de la vegetación y temperatura del aire o superficie (**Ecuación 3.1**).

$$ET = Rn (a_0 + a_1 * NDVI + a_2 * Ts)$$

Ecuación 3.1 Evapotranspiración

donde:

<i>ET</i>	Evapotranspiración		(W m ⁻²)
<i>Rn</i>	Radiación neta	(Ecuación 3.6)	(W m ⁻²)
<i>NDVI</i>	Índice de Vegetación de Diferencia Ajustada	(Ecuación 3.24)	(adimensional)
<i>Ts</i>	Temperatura de superficie	(Ecuación 3.21)	(K)
<i>a₀</i>	Coeficiente de regresión		(adimensional)
<i>a₁</i>	Coeficiente de regresión		(adimensional)
<i>a₂</i>	Coeficiente de regresión		(adimensional)

Los coeficientes se calibraron utilizando mediciones terrestres en la región sur de Estados Unidos, con una base de datos del 2002 al 2005. Cabe destacar que los sitios donde se validó cubren una diversidad de coberturas desde pastizales, zonas agrícolas, bosque, suelo desnudo y coberturas mixtas, lo que se traduce en una posibilidad de aplicación en diferentes regiones.

La **Tabla 3.6** muestra los valores de los coeficientes utilizados en la parametrización de ET

Tabla 3.6 coeficientes para el cálculo de evapotranspiración

<i>Combinación</i>	a_0	a_1	a_3
NDVI, Ts	0.106	0.49	0.0039

Ajuste para transformar ($W m^{-2}$) a ($mm día^{-1}$)

La ET se expresa normalmente en milímetros (mm) por unidad de tiempo. Esta unidad expresa la cantidad de agua perdida de una superficie en unidades de altura de agua. La unidad de tiempo puede ser una hora, día, 10 días, mes o incluso un período completo de cultivo o un año.

Al aplicar la fórmula el resultado de ET está expresado en $W m^{-2}$ para lo cual es necesario aplicar la conversión a $mm día^{-1}$ como lo sugiere Allen et al., (2012).

Se tomó en cuenta la siguiente conversión expresada en $mm día^{-1}$ (Allen et al., 2012)

$$1 W m^{-2} = 0.0864 MJ m^{-2} día^{-1}$$

$$1 MJ m^{-2} día^{-1} = 0.408 mm día^{-1}$$

3.4.1 Pre-procesamiento

El preprocesamiento de los datos satelitales es una etapa de gran importancia, ya que implica la corrección o disminución de errores por efectos atmosféricos, con el objetivo de utilizar insumos de calidad y disminuir el margen de error de los estimados. Esta etapa está sustentada en algoritmos y los metadatos de cada imagen o sensor (Zanter, 2016).

Esto se logra bajo una serie de transformaciones y correcciones que permite mejorar la calidad de los datos empleados en la metodología, los cuales se muestran en la **Figura 3.11**.

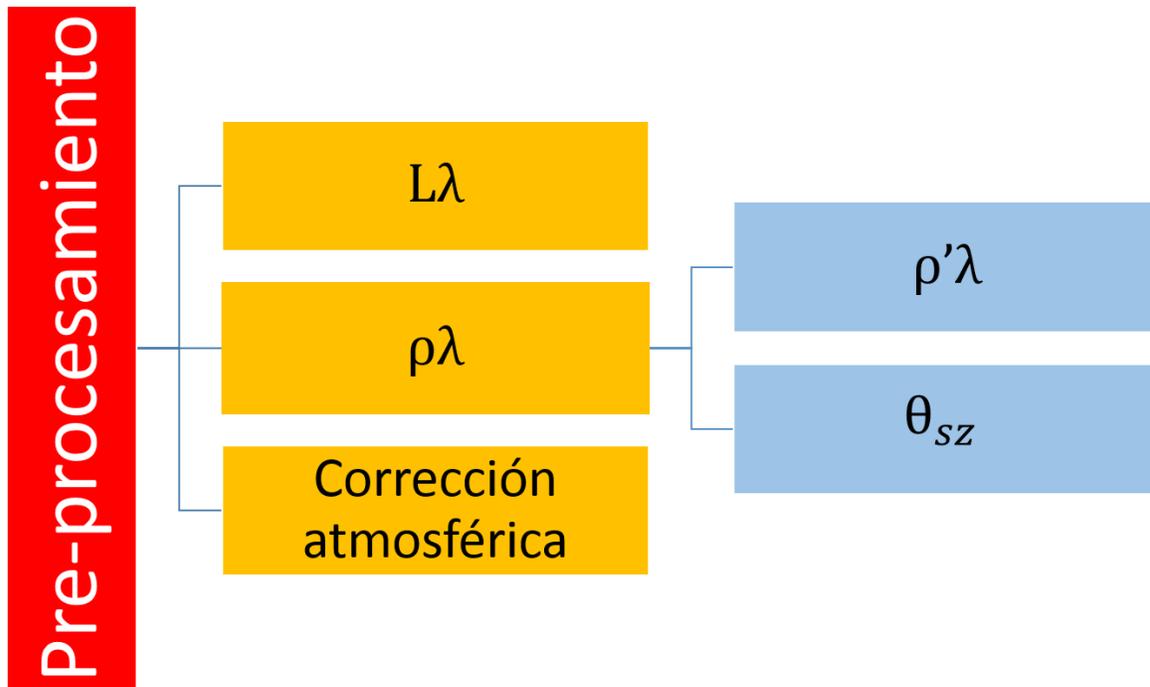


Figura 3.11 Diagrama para obtener el pre-procesamiento de datos

3.4.1.1 Radiancia espectral (L_λ)

Las imágenes se procesan en unidades de luminosidad absoluta utilizando cálculos de 32 bits. Estos valores se convierten en valores de 16 bits. Luego se pueden convertir a luminosidad espectral utilizando los factores de escala de luminosidad proporcionados en el archivo metadatos.

De acuerdo con Zanter, (2016) se calcula (L_λ) para las bandas 2 a la 7, 10 y 11, de la siguiente manera:

$$L_\lambda = M_L * Q_{cal} + A_L$$

Ecuación 3.2 Radiancia espectral (L_λ)

donde

- | | | |
|---------------|--|---------------------------------------|
| L_λ = | radiancia espectral | (W/(m ² * sr * μm)) |
| M_L = | factor de escala multiplicativo de radiancia para la banda | (RADIANCE_MULT_BAND de los metadatos) |
| Q_{cal} = | banda Landsat 8 | (adimensional) |

A_L = factor de escala aditivo radiante para la banda (adimensional)
(RADIANCE_ADD_BAND de los metadatos)

3.4.1.2 Reflectancia espectral TOA ($\rho_{\lambda'}$)

Similar a la conversión a Radiancia, los valores enteros de 16 bits en el producto de nivel 1 también se pueden convertir a reflectancia TOA. La siguiente ecuación (Zanter, 2016), se utilizó para convertir los valores de la imagen representados en DN (número digital) del nivel 1 a reflectancia TOA para las bandas 2 a la 7.

$$\rho_{\lambda'} = M_{\rho} * Q_{cal} + A_{\rho}$$

Ecuación 3.3 Reflectancia espectral TOA sin corrección para ángulo solar ($\rho_{\lambda'}$)

donde

$\rho_{\lambda'}$ = reflectancia espectral TOA, sin corrección para ángulo solar (adimensional)

M_{ρ} = factor de escala multiplicativo de Reflectancia para la banda (adimensional)
(REFLECTANCE_MULT_BAND de los metadatos)

Q_{cal} = banda Landsat 8 (adimensional)

A_{ρ} = factor de escala aditivo de Reflectancia para la banda (adimensional)
(REFLECTANCE_ADD_BAND de los metadatos)

Reflectancia (ρ_{λ})

Tomar en cuenta que $\rho_{\lambda'}$ no es reflectancia, porque no contiene una corrección para el ángulo de elevación solar. Este factor de corrección se deja fuera de la escala de nivel 1 en solicitud de los usuarios; algunos usuarios están complacidos con el ángulo de elevación solar del centro de la escena en los metadatos, mientras que otros prefieren calcular su propio ángulo de elevación solar por píxel en toda la escena.

La reflectancia ρ_{λ} de acuerdo con Zanter, (2016) se calcula de la siguiente manera:

$$\rho_{\lambda} = \frac{\rho_{\lambda'}}{\cos \theta_{sz}} = \frac{\rho_{\lambda'}}{\sin \theta_{SE}}$$

Ecuación 3.4 Reflectancia (ρ_{λ})

donde

ρ_{λ} =	reflectancia	(adimensional)
$\rho_{\lambda'}$ =	reflectancia espectral TOA, sin corrección para ángulo solar	(adimensional)
θ_{SE} =	ángulo de elevación solar local (extraído de metadatos de la imagen, SUN_ELEVATE)	(adimensional)
θ_{SZ} =	ángulo cenital solar local	(adimensional)

Ángulo cenital solar local (θ_{SZ})

De acuerdo con Zanter, (2016) el (θ_{SZ}) se calcula:

$$\theta_{SZ} = 90^{\circ} - \theta_{SE}$$

Ecuación 3.5 ángulo cenital solar local (θ_{SZ})

3.4.1.3 Corrección Atmosférica

Éste tipo de procesamiento sobre las imágenes no es para corregir defectos en la adquisición si no para subsanar las deficiencias en la captura debido a causas atmosféricas, ya sea por la presencia de aerosoles, nubes, el amortiguamiento atmosférico debido al trayecto de la luz a través de la atmósfera, variaciones en la inclinación del relieve, sombras proyectadas por montañas, e incluso debido al ángulo de inclinación de los rayos solares respecto a la superficie (Chander et al., 2009).

En el caso de las nubes, éstas pueden afectar de diferente manera dependiendo de su tipo. Las nubes cumulus pueden bloquean totalmente la recepción de la señal de la superficie terrestre, nubes cirrus atenúan la intensidad de la señal; asimismo las sombras generadas sobre la superficie terrestre. Existen trabajos relacionados a la remoción de nubes de las imágenes; sin embargo, los algoritmos desarrollados para este efecto son muy dependientes del sensor.

Los defectos debido a la inclinación se corrigen por medio de parámetros que los sensores remotos capturan junto con la imagen, de tal forma que mediante una sencilla formula se puede corregir (Chandran & Christy, 2015).

Modelo de reflectancia aparente

Con la finalidad de hacer eficiente la metodología y teniendo en cuenta que se trabajó en el software TerrSet se sugiere utilizar el módulo Landsat (**Figura 3.12**). Este módulo importa

datos Landsat archivados en formato GeoTIFF utilizando el archivo de metadatos Landsat (MTL). Usando los parámetros que se encuentran en el archivo de texto MTL, las imágenes se convertirán al formato IDRISI, ya sea como DN sin procesar, radiancias en la parte superior de la atmósfera o reflectancias. Las bandas térmicas también se pueden importar y corregir radiométricamente (Turner & Spencer, 1973).

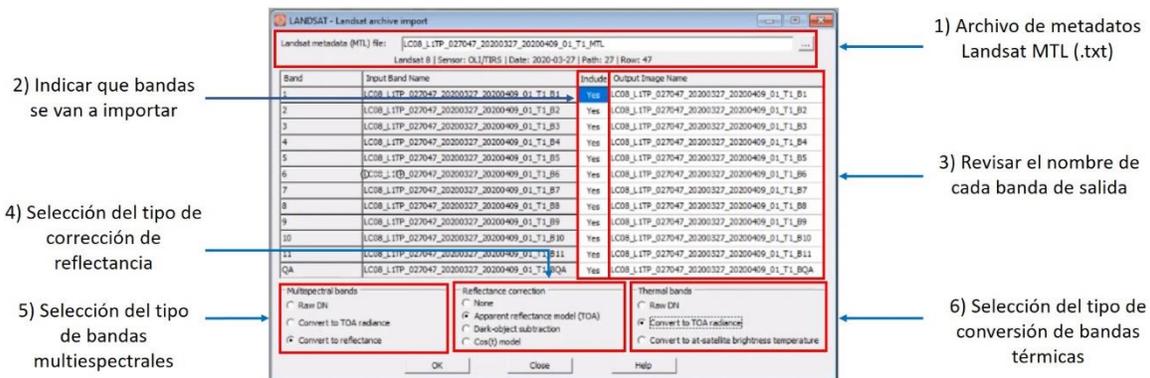


Figura 3.12 Datos de entrada con selección de conversión a realizar

3.4.1.4 Calidad de datos de la imagen

La banda de evaluación o control de la Calidad (BQA) es una banda de datos adimensionales muy importante en Landsat 8. Cada pixel de la banda control de calidad contiene un valor decimal que representa las combinaciones de bits de relleno de la superficie, atmósfera y las condiciones de sensores que pueden afectar a la utilidad y/o aplicación de un pixel dado, es por ello que esta banda puede utilizarse como máscara a fin de evitar errores en los resultados.

De acuerdo USGS, (2018) se utiliza la siguiente clasificación debido a que la imagen de calidad Landsat de 8 bits proporciona una descripción de la calidad de los píxeles dentro de una escena que puede ayudar al usuario a determinar su idoneidad para la aplicación. Mencionando que el valor de 2720 representa un pixel despejado

En las **Tablas 3.7-3.8** se muestran las clasificaciones/restricciones a partir de la Banda BQA:

Tabla 3.7 Reclasificación para corrección atmosférica, banda BQA con valor 0

valor	a todos los valores de	a menos de
0	0	2720
1	2720	2720.99
0	2720.99	9999

Tabla 3.8 Reclasificación para corrección atmosférica, banda BQA con valor -9999

valor	a todos los valores de	a menos de
-9999	0	2720
0	2720	2720.99
-9999	2720.99	9999

Aplicando el siguiente proceso para cada banda:

- Banda 1 * Reclasificación valor 0 + Reclasificación valor -9999 = Nombre de salida
 Banda 2 * Reclasificación valor 0 + Reclasificación valor -9999 = Nombre de salida
 Banda 3 * Reclasificación valor 0 + Reclasificación valor -9999 = Nombre de salida

3.5 Radiación neta (R_n)

De acuerdo con Allen et al., (2002), la radiación neta se define como la diferencia entre los flujos de radiación neta incidente y los flujos de radiación neta saliente. La cual se calcula mediante un balance de los flujos salientes y flujos entrantes incluyendo la radiación solar y la térmica, por lo que representa la energía radiante actual disponible en la superficie que es repartida en los flujos H, G y LE .

$$R_n = (1 - \alpha)R_{s\downarrow} + R_{L\downarrow} - R_{L\uparrow} - (1 - \epsilon_0)R_{L\downarrow}$$

Ecuación 3.6 Radiación neta (R_n)

donde:

- R_n = radiación neta (W m⁻²)
 α = albedo de superficie (adimensional)

- $R_{s\downarrow}$ = radiación de onda corta entrante (W m⁻²)
- $R_{L\downarrow}$ = radiación de onda larga entrante (W m⁻²)
- $R_{L\uparrow}$ = radiación de onda larga saliente (W m⁻²)
- ϵ_0 = emisividad térmica de superficie de banda ancha (adimensional)

Esto se logra en una serie de pasos para calcular los elementos que ayudan a completar el componente (Rn). En la **Figura 3.13** se muestra a manera de esquema el proceso y los cálculos para cada componente.

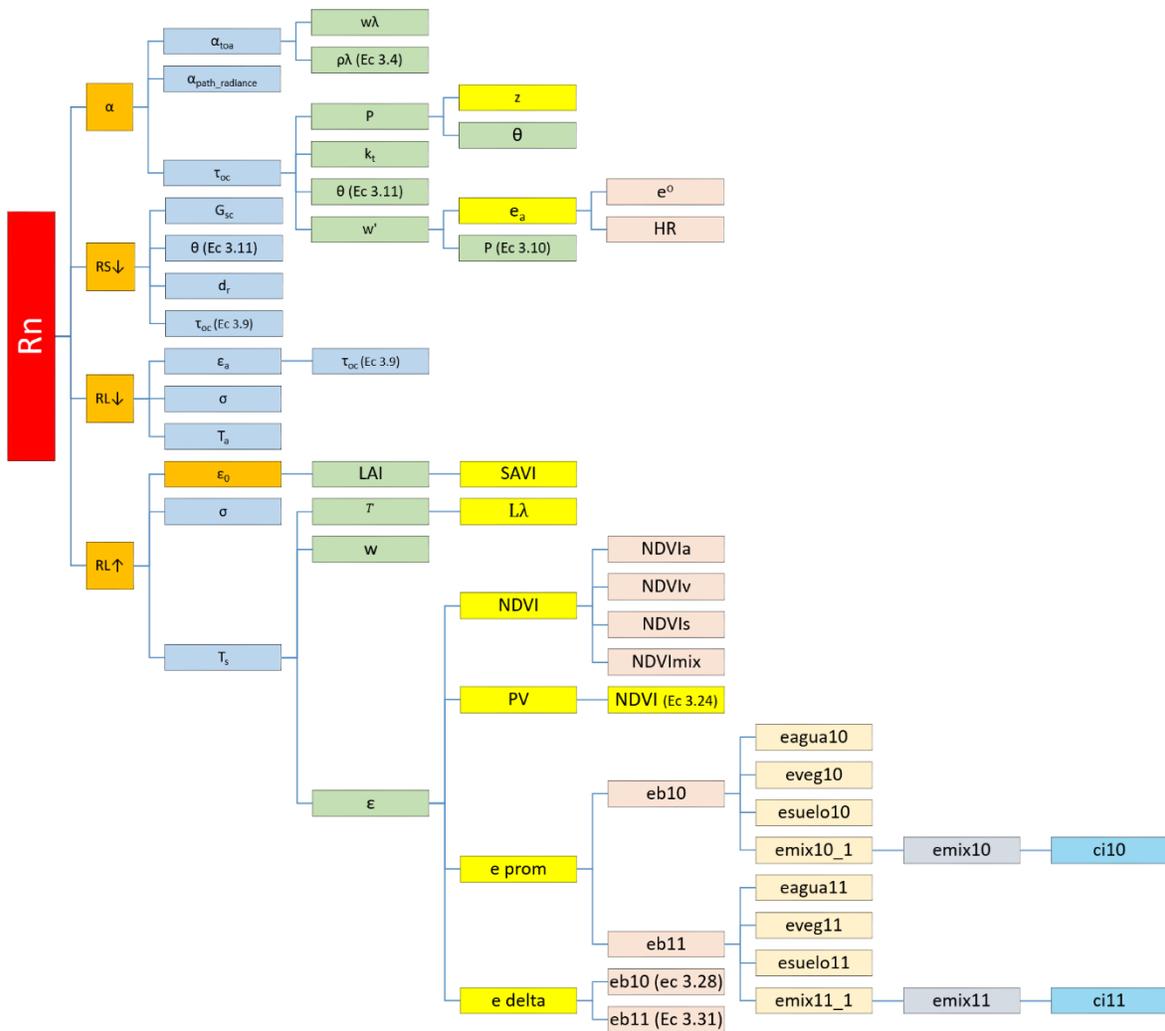


Figura 3.13 Diagrama para cálculo de Rn y sus componentes

3.5.1 Albedo de superficie (α)

Es una propiedad adimensional que representa la fracción de la energía solar reflejada por la superficie. Es expresada como la relación de la energía radiante dispersada verticalmente hacia arriba por la superficie en todas las direcciones, con respecto a la energía recibida

Esta es la energía de radiación saliente de la banda observada en la parte superior de la atmósfera por el satélite y se calcula corrigiendo la α_{toa} para la transmisividad atmosférica de la siguiente manera (Allen et al., 2002):

$$\alpha = \frac{\alpha_{toa} - \alpha_{path_radiance}}{\tau_{oc}^2}$$

Ecuación 3.7 Albedo (α)

donde

α	=	albedo de superficie	(adimensional)
α_{toa}	=	albedo en la parte superior de la atmósfera	(adimensional)
$\alpha_{path_radiance}$	=	porción promedio de la radiación solar entrante	(adimensional)
τ_{oc}	=	transmisividad atmosférica	(adimensional)

Esto se logra bajo una serie de pasos que permite calcular cada elemento que ayuda a completar la metodología. La **Figura 3.14** muestra el proceso.

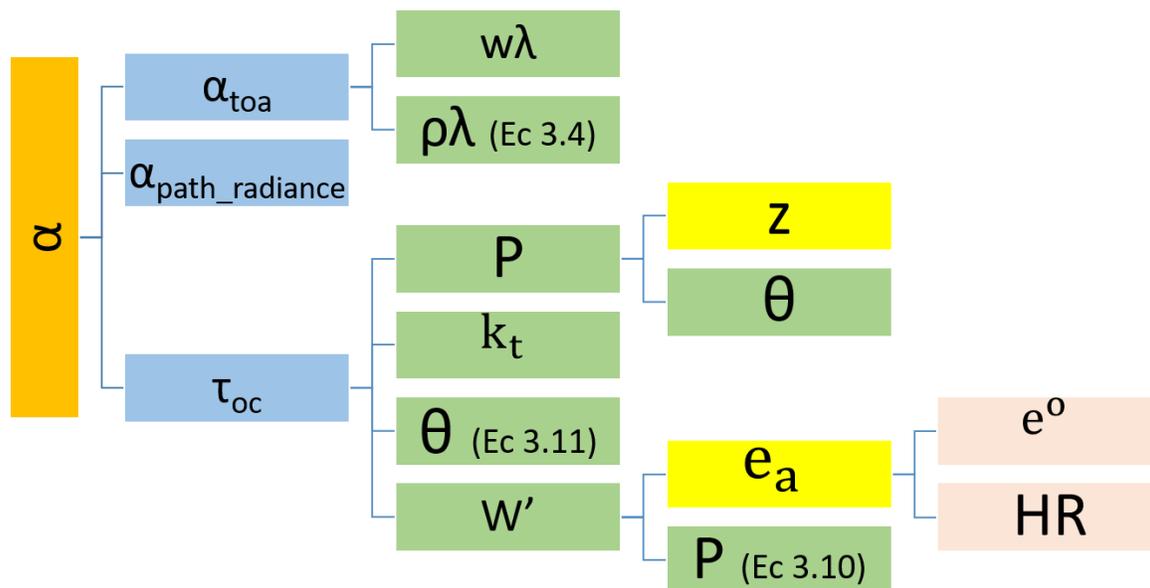


Figura 3.14 Diagrama cálculo de albedo (α) y sus componentes

3.5.1.1 Albedo ajustado por la transmisividad atmosférica (α_{toa})

De acuerdo con Allen et al., (2002), (α_{toa}) se calcula de la siguiente manera:

$$\alpha_{toa} = \sum (w\lambda * \rho\lambda)$$

Ecuación 3.8 Albedo ajustado por la transmisividad atmosférica (α_{TOA})

donde

- α_{toa} = albedo sin corrección atmosférica (adimensional)
- $\rho\lambda$ = Reflectancia de las bandas 2-7 (Ecuación 3.4) (adimensional)
- $w\lambda$ = coeficiente de ponderación para cada banda (Tabla 3.9) (adimensional)

Coefficiente de ponderación para cada banda ($w\lambda$)

Existen diferentes técnicas para la determinación del albedo superficial con base en imágenes satelitales. Sin embargo, el más utilizado con imágenes Landsat en investigaciones que involucran balance de radiación y energía resulta de la propuesta desarrollada por

Bastiaanssen et al., (1998). Esta ecuación requiere la identificación de los pesos o la contribución relativa de cada banda espectral en la composición del albedo en todo el espectro de radiación solar. Dado que se utilizó el sensor Landsat 8, el trabajo realizado por Silva et al., (2016), sirvió para establecer los coeficientes de ponderación para cada banda.

Tabla 3.9 Peso para obtener media de Albedo

Bandas	Coefficiente medio (w)
2	0.300
3	0.277
4	0.233
5	0.143
6	0.036
7	0.012

3.5.1.2 Proporción promedio de radiación solar entrante ($\alpha_{path_radiance}$)

Los valores de $\alpha_{path_radiance}$ oscilan entre 0.025 y 0.04, en este sentido Allen et al., (2002) recomiendan emplear un valor de 0.03.

3.5.1.3 Transmisividad atmosférica (τ_{oc})

La transmisividad atmosférica se define como la fracción de radiación incidente que es transmitida por la atmósfera y representa los efectos de absorción y reflexión que ocurren dentro de la atmósfera. Se calcula utilizando una función general de Walter et al., (2000):

$$\tau_{oc} = 0.35 + 0.627 \exp \left[-\frac{0.00146 * P}{K_t \cos \theta} - 0.075 \left(\frac{W}{\cos \theta} \right)^{0.4} \right]$$

Ecuación 3.9 Transmisividad atmosférica (τ_{oc})

donde

- P = presión atmosférica kPa
- k_t = coeficiente de turbidez del aire ($k_t = 1.0$ aire despejado y $k_t = 0.5$ aire contaminado)
- θ = ángulo cenital del Sol (extraído de metadatos de la imagen, SUN_ELEVATE)
- W' = agua precipitable (mm)

Presión atmosférica (P)

Presión atmosférica (P) es la presión ejercida por el peso de la atmósfera terrestre y se calcula de la siguiente manera (Walter et al., 2000):

$$P = 101.3 \left(\frac{(293 - (0.0065 * z))}{293} \right)^{5.26}$$

Ecuación 3.10 Presión atmosférica (P)

donde

P =	presión atmosférica	kPa
z =	elevación sobre el nivel del mar	msnm
θ =	ángulo cenital del Sol	(extraído de metadatos de la imagen, SUN_ELEVATE)

Elevación sobre el nivel del mar (z)

Esta elevación debería representar mejor el área de interés, para este caso se emplea el valor de la elevación de la estación meteorológica o Eddy covariance.

Ángulo cenital del Sol (θ)

Este componente es calculado de la siguiente manera:

$$\theta = \cos(90 - \theta) * (\pi/180)$$

Ecuación 3.11 Ángulo cenital del Sol (θ)

donde

θ = (extraído de metadatos de la imagen, "SUN_ELEVATE")

Agua precipitable (W')

De acuerdo con Garrison & Adler, (1990), W' se calcula de la siguiente manera:

$$W' = 0.14 * e_a * P + 2.1$$

Ecuación 3.12 Agua precipitable (W')

donde

W' =	agua precipitable	mm
e_a =	presión real de vapor	kPa

$P =$ presión atmosférica (Ecuación 3.10) kPa

Presión real de vapor (e_a)

De acuerdo con Allen et al., (2012), e_a se calcula de la siguiente manera:

$$e_a = e^0 * \frac{HR}{100}$$

Ecuación 3.13 Presión real de vapor (e_a)

donde

$e_a =$ presión real de vapor (kPa)

$e^0 =$ presión de saturación de vapor a la temperatura (kPa)

HR = humedad relativa (*extraída de base de datos de estación meteorológica*) (%)

Presión de saturación de vapor a la temperatura e^0

La presión de saturación de vapor a la temperatura de acuerdo con Allen et al., (2012) se calculó de la siguiente manera:

$$e^0 = 0.6108 \exp \left[\frac{17.27 * T_{ambiente}}{T_{ambiente} + 237.3} \right]$$

Ecuación 3.14 Presión de saturación de vapor a la temperatura (e^0)

donde

$e^0 =$ presión de saturación de vapor a la temperatura kPa

$T_{ambiente} =$ temperatura ambiente (*extraída de base de datos de estación meteorológica*) °C

3.5.2 Radiación de onda corta entrante ($R_{s\downarrow}$)

Es el flujo de radiación solar directa y difusa que realmente alcanza la superficie de la Tierra expresada en Wm^{-2} . Se calcula, asumiendo condiciones de cielo despejado, como una constante para el tiempo de imagen, aplicando la siguiente expresión:

$$R_{s\downarrow} = G_{sc} * \cos \theta * d_r * \tau_{oc}^2$$

Ecuación 3.15 Radiación de onda corta entrante ($R_{s\downarrow}$)

donde

G_{sc} = constante solar		1367 W m ⁻²
θ = ángulo cenital del Sol	(Ecuación 3.11)	adimensional
d_r = distancia relativa Tierra-Sol		adimensional
τ_{oc} = transmisividad atmosférica	(Ecuación 3.9)	adimensional

Esto se logra bajo una serie de pasos que permite calcular cada elemento que ayuda a completar la metodología. La **Figura 3.15** muestra el proceso.

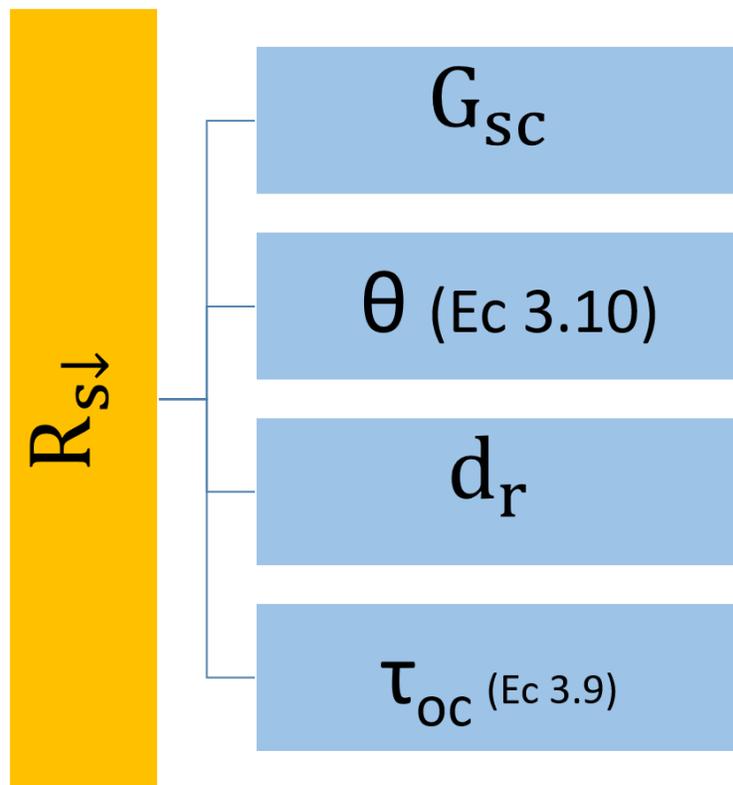


Figura 3.15 Radiación de onda corta entrante ($R_{s\downarrow}$) y sus componentes

3.5.2.1 Distancia relativa Tierra-Sol (d_r)

d_r se calcula utilizando la ecuación de Blonquist Jr et al., (2010).

$$d_r = 1 + 0.033 \cos\left(DOY \frac{2\pi}{365}\right)$$

Ecuación 3.16 Distancia relativa tierra-Sol (d_r)

Donde, DOY es el día secuencial del año (1-365 días) dado en las **Tablas 3.10** y **3.11**, y el ángulo ($\text{DOY} * 2\pi / 365$) está expresada en radianes.

Tabla 3.10 Día correspondiente a día juliano

Día	Enero	Febrero	Marzo *	Abril	Mayo	Junio
1	1	32	60	91	121	152
2	2	33	61	92	122	153
3	3	34	62	93	123	154
4	4	35	63	94	124	155
5	5	36	64	95	125	156
6	6	37	65	96	126	157
7	7	38	66	97	127	158
8	8	39	67	98	128	159
9	9	40	68	99	129	160
10	10	41	69	100	130	161
11	11	42	70	101	131	162
12	12	43	71	102	132	163
13	13	44	72	103	133	164
14	14	45	73	104	134	165
15	15	46	74	105	135	166
16	16	47	75	106	136	167
17	17	48	76	107	137	168
18	18	49	77	108	138	169
19	19	50	78	109	139	170
20	20	51	79	110	140	171
21	21	52	80	111	141	172
22	22	53	81	112	142	173
23	23	54	82	113	143	174
24	24	55	83	114	144	175
25	25	56	84	115	145	176
26	26	57	85	116	146	177
27	27	58	86	117	147	178
28	28	59	87	118	148	179
29	29	(60)	88	119	149	180
30	30	-	89	120	150	181
31	31	-	90	-	151	-

* Agregar 1 si es año bisiesto

Tabla 3.11 Continuación día correspondiente a día juliano (DOY)

Día	Julio*	Agosto*	Septiembre*	Octubre*	Noviembre*	Diciembre*
1	182	213	244	274	305	335
2	183	214	245	275	306	336
3	184	215	246	276	307	337
4	185	216	247	277	308	338
5	186	217	248	278	309	339
6	187	218	249	279	310	340
7	188	219	250	280	311	341
8	189	220	251	281	312	342
9	190	221	252	282	313	343
10	191	222	253	283	314	344
11	192	223	254	284	315	345
12	193	224	255	285	316	346
13	194	225	256	286	317	347
14	195	226	257	287	318	348
15	196	227	258	288	319	349
16	197	228	259	289	320	350
17	198	229	260	290	321	351
18	199	230	261	291	322	352
19	200	231	262	292	323	353
20	201	232	263	293	324	354
21	202	233	264	294	325	355
22	203	234	265	295	326	356
23	204	235	266	296	327	357
24	205	236	267	297	328	358
25	206	237	268	298	329	359
26	207	238	269	299	330	360
27	208	239	270	300	331	361
28	209	240	271	301	332	362
29	210	241	272	302	333	363
30	211	242	273	303	334	364
31	212	243	-	304	-	365

* Agregar 1 si es año bisiesto

3.5.3 Radiación de onda larga entrante ($R_{L\downarrow}$)

Es el flujo de radiación térmica descendente desde la atmósfera (Wm^{-2}). Se calcula utilizando la ecuación de Stefan-Boltzmann:

$$R_{L\downarrow} = \varepsilon_a * \sigma * T_a^4$$

Ecuación 3.17 Radiación de onda larga entrante ($R_{L\downarrow}$)

donde

ϵ_a =	emisividad atmosférica	adimensional
σ =	constante de Stefan-Boltzmann	$5.67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}/\text{K}^{-4}$
T_a =	temperatura del aire (<i>extraída de base de datos de estación meteorológica</i>)	K

Esto se logra bajo una serie de pasos que permite calcular cada elemento que ayuda a completar la metodología. La **Figura 3.16** muestra el proceso.

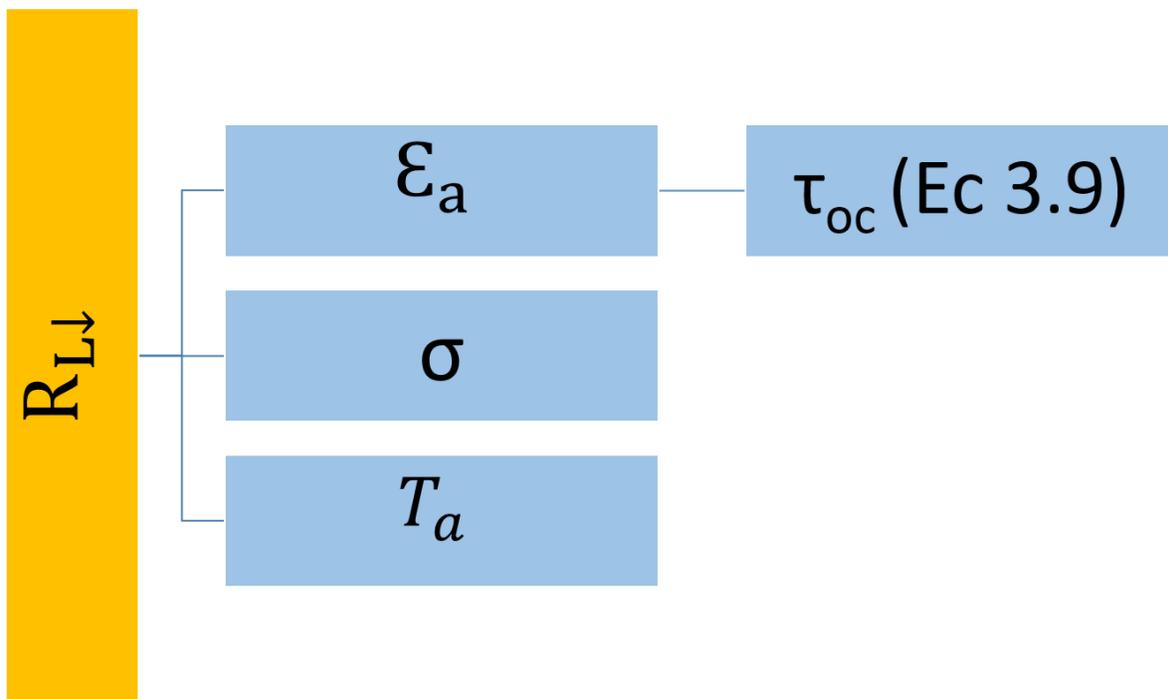


Figura 3.16 Diagrama Radiación de onda larga entrante ($R_{L\downarrow}$) y sus componentes

3.5.3.1 Emisividad atmosférica (ϵ_a)

Bastiaanssen et al., (1998) recomiendan aplicar la siguiente ecuación empírica para estimar

ϵ_a :

$$\epsilon_a = 0.85 (-\ln \tau_{oc})^{.09}$$

Ecuación 3.18 emisividad atmosférica (ϵ_a)

Donde τ_{oc} es la transmisividad atmosférica calculada en la *Ecuación 3.9* (adimensional)

3.5.4 Radiación de onda larga saliente ($R_{L\uparrow}$)

La radiación de onda larga saliente es el flujo de radiación térmica emitido desde la superficie de la tierra a la atmósfera expresada en Wm^{-2} . Se calculó basada en la ecuación propuesta por Allen et al. (2002) a través de los siguientes pasos con la *Ecuación 3.19*:

$$R_{L\uparrow} = \varepsilon_0 * \sigma * T_s^4$$

Ecuación 3.19 Radiación de onda larga saliente ($R_{L\uparrow}$)

donde;

$R_{L\uparrow}$ =	radiación de onda larga saliente	$W m^{-2}$
ε_0 =	emisividad de superficie de banda ancha	adimensional
σ =	constante de Stefan-Boltzmann	$5.67 \times 10^{-8} Wm^{-2}/K^{-4}$
T_s =	temperatura de superficie	K

Esto se logra bajo una serie de pasos que permite calcular cada elemento que ayuda a completar la metodología. La *Figura 3.17* muestra el proceso.

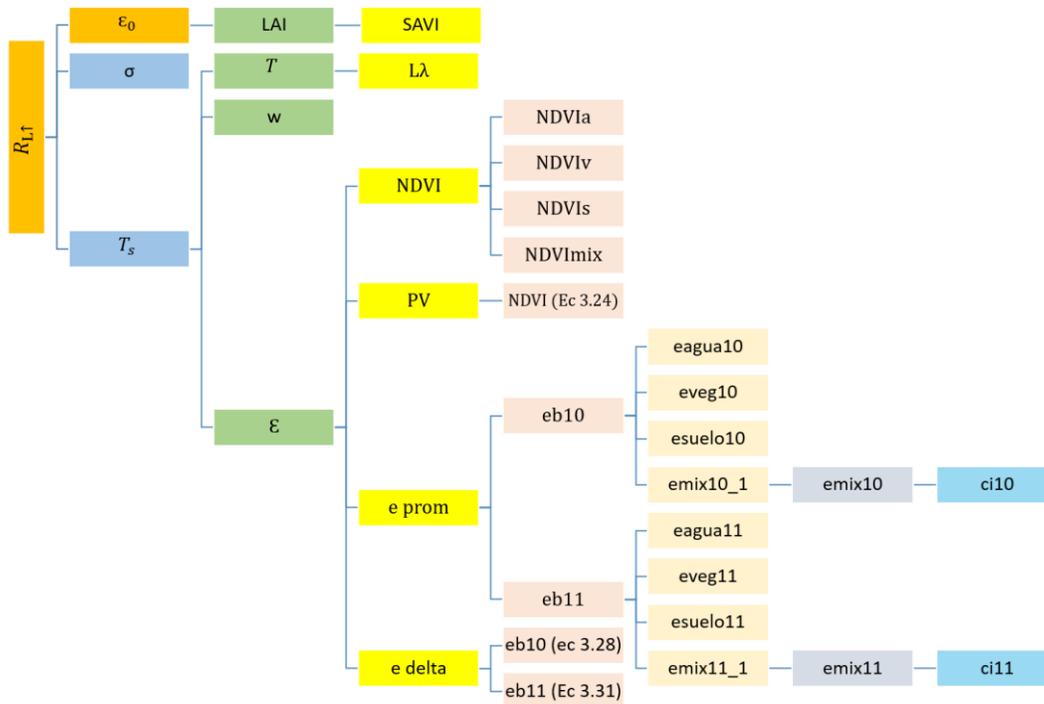


Figura 3.17 Diagrama Radiación de onda larga saliente ($R_{L\uparrow}$) y sus componentes

3.5.4.1 Emisividad de superficie (ϵ_0)

La emisividad superficial (ϵ) es la relación entre la energía térmica radiada por la superficie y la energía térmica radiada por un cuerpo negro a la misma temperatura. Se utilizan dos emisividades de superficie. El primero es una emisividad que representa el comportamiento de la superficie para la emisión térmica (10.4 a 12.5 μm), expresada como ϵ_{NB} . El segundo es una emisividad de banda ancha que representa el comportamiento de la superficie para la emisión térmica en el amplio espectro térmico (6 a 14 μm), expresado como ϵ_0 .

Las ϵ se calcularon de acuerdo con Allen et al., (2002) de la siguiente manera:

$$\epsilon_{NB} = 0.97 + 0.0033 * LAI \quad \text{para } LAI < 3$$

$$\epsilon_0 = 0.95 + 0.01 * LAI \quad \text{para } LAI < 3$$

Para el presente trabajo se utilizan los siguientes valores:

$$\epsilon_{NB} = 0.98 \text{ y } \epsilon_0 = 0.98; \quad \text{para } LAI \geq 3$$

Índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI)

SAVI es un índice de vegetación que intenta restar los efectos del suelo de fondo, efecto que se presenta en el NDVI, a fin de reducir los impactos de la humedad del suelo y el suelo desnudo en el índice de vegetación (Huete, 1988):

$$SAVI = \frac{(1 + L)(\rho_5 - \rho_4)}{(L + \rho_5 + \rho_4)}$$

Ecuación 3.20 Índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI)

donde

- L = factor de ajuste de suelo desnudo (1 a 0), es recomendable asumir valor de 0.5 para superficies heterogéneas (adimensional)
- ρ_5 = reflectividad para la banda 5 (adimensional)
- ρ_4 = reflectividad para la banda 4 (adimensional)

Índice de área foliar (LAI)

El LAI es la relación entre el área total de todas las hojas de una planta y el área del suelo representado por la planta. Asumiendo que los valores a nivel píxel son >5 cuando el área foliar tiene diferentes estratos y se considera de alta cobertura vegetal, caso contrario cuando los valores son cercanos a cero, se asume que la superficie presenta cobertura vegetal escasa o nula, en este caso cuando el suelo desnudo.

De acuerdo con Trezza, (2002) se empleó una reclasificación a SAVI menor y mayor a 0.817, este último representaría un píxel con condición de alta cobertura vegetal, podría tratarse de un bosque denso o un cultivo de alta densidad foliar, sano y sin restricciones de disponibilidad hídrica:

$$SAVI \leq 0.817$$

Tabla 3.12 Reclasificación SAVI ≤ 0.817

valor	a todos los valores de	a menos de
1	-9999	0.817
0	0.817	9999

SAVI > 0.817

Tabla 3.13 Reclasificación SAVI > 0.817

valor	a todos los valores de	a menos de
1	0.817	9999
0	-9999	0.817

Para estimar LAI, se considera como un efecto de la relación del índice de vegetación SAVI. A los píxeles en los que $SAVI \leq 0.817$, se asumió que $LAI = (11) * (SAVI)^3$

Para píxeles donde $SAVI > 0.817$, se consideró que $LAI = 6$. Esto bajo el supuesto del mayor valor registrado para un cultivo de alta densidad foliar o una vegetación sana y densa.

3.5.4.2 Temperatura de superficie (T_s)

La temperatura de superficie es un componente que se utiliza para restringir la estimación del flujo de calor en el suelo (G) y el flujo de calor sensible (H). Temperatura de superficie (T_s) se calcula con base en el algoritmo Split-window para Landsat 8 (Jimenez-Muñoz et al., 2014) de la siguiente forma:

$$T_s = T_i + c_1(T_i - T_j) + c_2(T_i - T_j)^2 + c_0 + (c_3 + c_4 * w) * (1 - \epsilon) + (c_5 + c_6 * w)\Delta\epsilon$$

Ecuación 3.21 Temperatura de superficie (T_s)

donde

- T_s = temperatura de superficie (K)
- T_i = temperatura de brillo banda 10 (K)
- T_j = temperatura de brillo banda 11 (K)
- w = contenido de vapor de agua (g.cm⁻²)
- e promedio = emisividad promedio (Ecuación 3.32) (adimensional)
- $\Delta\epsilon$ = delta emisividad (Ecuación 3.33) (adimensional)
- c_0 a c_6 = coeficientes de la metodología (Tabla 3.14) (adimensional)

Tabla 3.14 Coeficientes metodología split windows

coeficientes	
c_0	-0.268
c_1	1.378
c_2	0.183
c_3	54.3
c_4	-2.238
c_5	-129.2
c_6	16.4

Temperatura de brillo (T) para banda 10 & banda 11

Se define como la temperatura efectiva vista por el satélite bajo un supuesto de emisividad unitaria. De acuerdo con Zanter, (2016), se calcula de la siguiente manera:

$$T = \frac{k_2}{\ln\left(\frac{k_1}{L_\lambda} + 1\right)}$$

Ecuación 3.22 Temperatura de brillo (T)

donde

$T =$	temperatura de brillo de la atmósfera	K
$L_\lambda =$	radiancia espectral	(W/(m ² * sr * μm))
$k_1 =$	constante de conversión térmica específica de la banda a partir de los metadatos	(K1_CONSTANT_BAND del número de banda térmica)
$k_2 =$	constante de conversión térmica específica de la banda a partir de los metadatos	(K2_CONSTANT_BAND del número de banda térmica)

Contenido de vapor de agua (w)

Para las imágenes Landsat 8 un problema que generalmente ocurre es la dificultad para obtener contenido de vapor de agua (w) *in situ*. En general, hay dos formas de resolver este problema. Una es la estimación arbitraria de w para la imagen de acuerdo con las condiciones atmosféricas y de latitud de la región de estudio. En general, el contenido se puede dar arbitrariamente como 2.5 g.cm⁻² para cielo despejado en verano en latitudes medias. Otra opción, es utilizar los datos de humedad del aire de una estación cercana en la región de las imágenes. Cuando podemos obtener la humedad del aire y la temperatura del aire (Ta) de la

estación. El contenido de vapor de agua en la columna atmosférica hasta la altitud del satélite se puede estimar de acuerdo con Wang et al., (2015), de la siguiente manera:

$$w = \frac{HR * E * A}{1000}$$

Ecuación 3.23 Contenido de vapor en el agua (w)

donde

w	= contenido de vapor de agua	(g cm ⁻²)
HR	= humedad relativa (<i>extraída de base de datos de estación meteorológica</i>)	(%)
E	= proporción de saturación de mezcla (<i>extraída de tabla 3.15</i>)	(g kg)
A	= densidad del aire (<i>extraída de tabla 3.15</i>)	(g m ³)

La **Tabla 3.15** proporciona la relación de mezcla de saturación y vapor de agua para varias temperaturas.

Tabla 3.15 Densidad del aire (A) y relación de mezcla de saturación (E) de vapor de agua a aire para varias temperaturas del aire (T), (F. Wang et al., 2015).

T (°C)	45	40	35	30	25	20	15	10	5	0	-5	-10
E (g·kg ⁻¹)	66.3	49.8	37.3	27.7	20.4	15	10.8	7.8	5.5	3.8	2.5	1.6
A (kg·m ⁻³)	1.11	1.13	1.15	1.17	1.18	1.21	1.23	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3

Emisividad (ϵ) para banda 10 & banda 11

Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)

El NDVI es un indicador sensible de la cantidad y condición de la vegetación verde. Los valores para NDVI oscilan entre -1 y +1. Las superficies verdes tienen un NDVI entre 0-1 y los cuerpos de agua y las nubes suelen ser inferiores a cero.

Se calculan tres índices de vegetación de uso común. El índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), el índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI) y el índice de área foliar (LAI) se calculan utilizando los valores de reflectividad. Estos índices pueden usarse

para predecir diversas características de la vegetación, aunque su preferencia entre uno y otro depende de las características de la zona de estudio y objetivos planteados por el usuario.

El **NDVI** es la relación de las diferencias en reflectividad de la banda de infrarrojo cercano (ρ_5) y la banda roja (ρ_4):

$$NDVI = \left(\frac{\rho_5 - \rho_4}{\rho_5 + \rho_4} \right)$$

Ecuación 3.24 Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI)

donde

ρ_5 = reflectividad para la banda 5 (adimensional)

ρ_4 = reflectividad para la banda 4 (adimensional)

NDVIa, NDVIv, NDVI_s, NDVI_{mix}

donde

NDVIa = Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada sólo agua (adimensional)

NDVIv = Índice de vegetación de diferencia Normalizada sólo vegetación (adimensional)

NDVI_s = Índice de vegetación de diferencia Normalizada solo suelo (adimensional)

NDVI_{mix} = Índice de vegetación de diferencia Normalizada cobertura mixta (adimensional)

De acuerdo con Jin et al., (2015) para obtener estos elementos, es necesario aplicar la siguiente reclasificación a NDVI.

NDVIa

Tabla 3.16 Reclasificación para NDVIa

valor	a todos los valores de	a menos de
1	-9999	0.01
0	0.01	9999

NDVIv

Tabla 3.17 Reclasificación para NDVIv

valor	a todos los valores de	a menos de
0	-9999	0.51
1	0.51	9999
0	1	9999

NDVI_s

Tabla 3.18 Reclasificación para NDVI_s

valor	a todos los valores de	a menos de
0	-9999	0.01
1	0.01	0.21
0	0.21	9999

NDVI_{mix}

Tabla 3.19 Reclasificación para NDVI_{mix}

valor	a todos los valores de	a menos de
0	-9999	0.01
1	0.21	0.51
0	0.51	9999

Proporción de vegetación (PV)

La proporción de la vegetación o Fracción de la cubierta vegetal es un estimador del grado de cubierta vegetal, y está basado en el NDVI, y los valores mínimos y máximos, asumiendo como máximo el valor 0.85 y el 0.2 como el valor mínimo para una cubierta vegetal, sin llegar a considerar como suelo desnudo.

$$PV = \left(\frac{NDVI - 0.2}{0.85 - 0.2} \right)^2$$

Ecuación 3.25 Proporción de la vegetación (PV)

donde

PV = proporción de la vegetación (adimensional)
NDVI = Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (adimensional)
(Ecuación 3.24)

Cálculo de emisividad banda 10

Índice de emisividad banda 10

$$ci10 = (1 - 0.9668) * (0.9863) * (0.55) * (1 - PV)$$

Ecuación 3.26 Índice de emisividad banda 10 (ci10)

donde

ci10 = índice de emisividad banda 10 (adimensional)
PV = proporción de la vegetación (Ecuación 3.25) (adimensional)

Emisividad mixta banda 10

$$emix10 = (0.9863 * PV) + (0.9668 * (1 - PV)) + (ci10)$$

Ecuación 3.27 Emisividad mixta banda 10 (emix10)

donde

emix10 = emisividad mixta banda 10 (adimensional)
PV = proporción de la vegetación (Ecuación 3.25) (adimensional)
ci10 = índice de emisividad banda 10 (Ecuación 3.26) (adimensional)

Aplicar la respectiva multiplicación a la reclasificación correspondiente

$$\begin{aligned}(NDVIa) * (0.991) &= \text{eagua10} \\(NDVIv) * (0.9863) &= \text{eveg10} \\(NDVI_s) * (0.9668) &= \text{esuelo10} \\(NDVI_{mix}) * (emix10) &= \text{emix10}_1\end{aligned}$$

Emisividad banda 10

$$eb10 = eagua10 + eveg10 + esuelo10 + emix10_1$$

Ecuación 3.28 Emisividad banda 10 (eb10)

donde

$eb10$	= emisividad banda 10	(adimensional)
$eagua10$	= emisividad en el agua banda 10	(adimensional)
$evég10$	= emisividad en la vegetación banda 10	(adimensional)
$esuelo10$	= emisividad en el suelo banda 10	(adimensional)
$emix10_1$	= emisividad mixta banda 10	(adimensional)

Cálculo de emisividad banda 11

Índice de emisividad banda 11

$$ci11 = (1 - 0.9747) * (0.9896) * (0.55) * (1 - PV)$$

Ecuación 3.29 Índice de emisividad banda 11 (ci11)

donde

$ci11$	= índice de emisividad banda 11	(adimensional)
PV	= proporción de la vegetación	(Ecuación 3.25) (adimensional)

Emisividad mixta banda 11

$$emix11 = (0.9896 * PV) + (0.9747 * (1 - PV)) + ci11$$

Ecuación 3.30 Emisividad mixta banda 11 (emix11)

donde

$emix11$	= emisividad mixta banda 11	(adimensional)
PV	= proporción de la vegetación	(Ecuación 3.25) (adimensional)
$ci11$	= índice de emisividad banda 11	(Ecuación 3.29) (adimensional)

Aplicar la respectiva multiplicación a la reclasificación correspondiente

$$\begin{aligned}(\text{NDVIa}) * (0.986) &= \text{eagua11} \\ (\text{NDVIv}) * (0.9896) &= \text{eveg11} \\ (\text{NDVIs}) * (0.9747) &= \text{esuelo11} \\ (\text{NDVImix}) * (\text{emix11}) &= \text{emix11}_1\end{aligned}$$

Emisividad banda 11

$$eb11 = \text{eagua11} + \text{eveg11} + \text{esuelo11} + \text{emix11}_1$$

Ecuación 3.31 Emisividad banda 11 (eb11)

donde

$eb11$	=	emisividad banda 11	(adimensional)
$eagua11$	=	emisividad en el agua banda 11	(adimensional)
$eveg11$	=	emisividad en la vegetación banda 11	(adimensional)
$esuelo11$	=	emisividad en el suelo banda 11	(adimensional)
$emix11_1$	=	emisividad mixta banda 11	(adimensional)

Emisividad promedio (e promedio)

$$e \text{ promedio} = \frac{eb10 + eb11}{2}$$

Ecuación 3.32 Emisividad promedio

donde

e promedio	=	emisividad promedio	(adimensional)
eb10	=	emisividad banda 10	(Ecuación 3.28) (adimensional)
eb11	=	emisividad banda 11	(Ecuación 3.31) (adimensional)

Emisividad delta ($\Delta\varepsilon$)

$$\Delta\varepsilon = eb10 - eb11$$

Ecuación 3.33 Emisividad delta ($\Delta\varepsilon$)

donde

$\Delta\varepsilon$	=	emisividad delta		(adimensional)
eb10	=	emisividad banda 10	<i>(Ecuación 3.28)</i>	(adimensional)
eb11	=	Emisividad banda 11	<i>(Ecuación 3.31)</i>	(adimensional)

3.6 Validación

La validación es el proceso establecido para la obtención de pruebas documentadas y demostrativas de que un método de análisis es lo suficientemente fiable para producir el resultado previsto. Los métodos más comunes para evaluar la confiabilidad de la modelación se basan en el análisis de diferencias entre valores medidos y calculados.

Para este trabajo la validación consistió en tomar el pixel donde se encuentra la estación Bernal junto con los pixeles que lo rodean y comparar los resultados estimados.

Para la evaluación de las incertidumbres generadas con la metodología utilizada en esta investigación se procuró en las medidas de desviación, las cuales fueron:

1.- La raíz del error cuadrático medio (RMSE):

Medida de uso frecuente para determinar las diferencias entre los valores predichos por el modelo y los valores observados. Ésta toma valores de cero sólo cuando los valores son idénticos y está definida por la siguiente ecuación:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i^{model} - Y_i^{obs})^2}$$

Ecuación 3.34 Raíz del error cuadrático medio (RMSE)

Donde Y_i^{model} y Y_i^{obs} son las modelaciones y las observaciones y n es el número total de datos.

2.- Sesgo (B):

El sesgo es la diferencia entre el valor observado y el valor simulado, toma valores negativos cuando el modelo reproduce valores menores a las observaciones (subestima) y valores positivos cuando los resultados son superiores a las observaciones, el modelo sobrestima; la relación del sesgo es:

$$B = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=n} (Y_i^{model} - Y_i^{obs})$$

Ecuación 3.35 Sesgo (B)

3.- Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE):

Es una medida adimensional, que relaciona directamente 1:1 (Nash & Sutcliffe, 1970) los valores observados con los predichos. Toma valores desde uno hasta menos infinito, considerándose los valores negativos como no recomendados para el modelo y los valores cercanos a 1 como un buen ajuste del modelo y está definida de la siguiente manera:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{1=n} (Y_i^{model} - Y_i^{obs})^2}{\sum_{i=1}^{1=n} (Y_i^{obs} - \bar{Y}^{obs})^2}$$

Ecuación 3.36 Eficiencia (NSE)

3.7 Metodología automatizada

Para llevar a cabo la programación de la metodología se tomó en cuenta la abstracción de la realidad por lo que fue necesario plantear la estructura de cada uno de los procesos en un diagrama general que marcó la pauta en la estimación de la ET.

Diagrama general

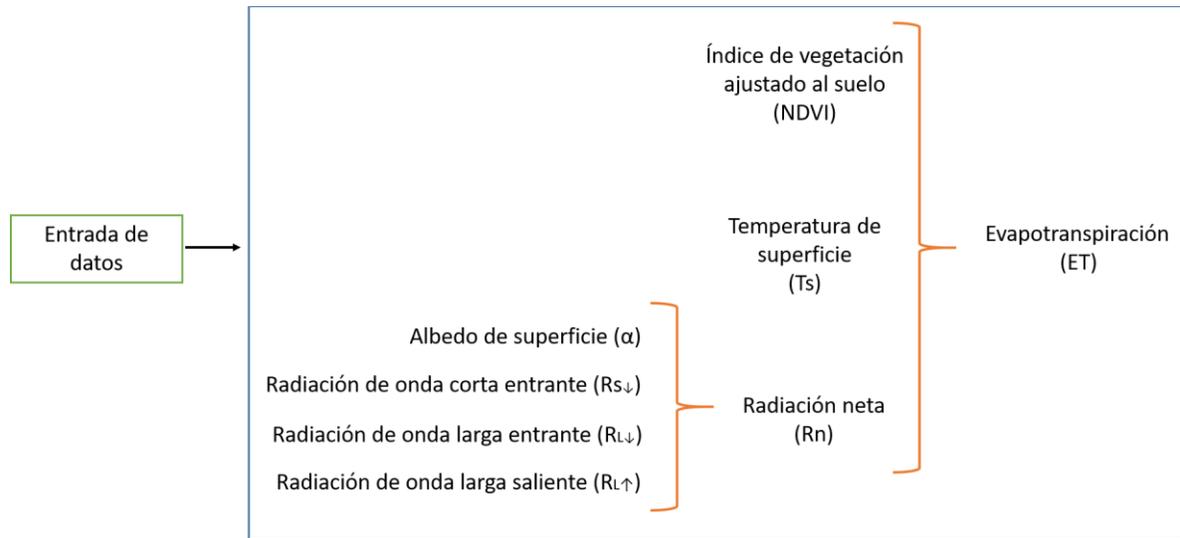


Figura 3.18 Diagrama general para interfaz de metodología automatizada

A partir del diagrama general se concibió el modelo global (**Figura 3.19**) el cual esquematiza cada uno de los módulos que son requeridos y que conforman la metodología implementada.



Figura 3.19 Esquema interfaz metodología automatizada

3.7.1 Tablas de entrada y salida de datos

A partir del modelo global se crearon submódulos para cada una de las variables. A continuación, se muestran las tablas de entrada y salida de datos para cada uno de los submódulos.

1) Entrada de datos

Tabla 3.20 Entrada y salida de datos para la entrada de datos

ENTRADA		SALIDA	
VARIABLE	FORMATO	VARIABLE	FORMATO
Metadatos imágenes Landsat 8	Archivo texto .txt	Máscara en los píxeles con valor a 0 en donde no exista buena calidad de datos	Archivo RST .rst
Datos meteorológicos *Humedad relativa *Temperatura ambiente *Altitud de la estación	Numérico		
Imágenes Landsat 8 Banda 2, 3, 4, 5, 6, 7, 10, 11, BQA	Archivo RST .rst		

2) Índices de vegetación

Tabla 3.21 Entrada y salida de datos para estimación de índices de vegetación

ENTRADA		SALIDA	
VARIABLE	FORMATO	VARIABLE	FORMATO
Imágenes Landsat 8 extraídos de submódulo 1) entrada de datos	Archivo RST .rst	NDVI	Archivo RST .rst
		SAVI	
		LAI	

3) Radiación de onda corta entrante $R_{s\downarrow}$

Tabla 3.22 Entrada y salida de datos para la estimación de radiación de onda corta entrante ($R_{s\downarrow}$)

ENTRADA		SALIDA	
VARIABLE	FORMATO	VARIABLE	FORMATO
Metadatos imágenes Landsat 8 extraídos de submódulo 1) entrada de datos	Archivo texto .txt	Estimación de Radiación de onda corta entrante $R_{s\downarrow}$	Valor numérico guardado en la memoria interna del módulo
Valores constantes previamente guardados en el módulo	Valores numéricos		

4) Albedo de superficie (α)

Tabla 3.23 Entrada y salida de datos para la estimación de albedo de superficie (α)

ENTRADA		SALIDA	
VARIABLE	FORMATO	VARIABLE	FORMATO
Metadatos imágenes Landsat 8 extraídos de submódulo 1) entrada de datos	Archivo texto .txt	Albedo de superficie (α)	Archivo RST .rst
Valores constantes previamente guardados en el módulo	Valores numéricos		
Imágenes Landsat 8 extraídos de submódulo 1) entrada de datos 2) índices de vegetación	Archivo RST .rst		

5) Temperatura de superficie (T_s)

Tabla 3.24 Entrada y salida de datos para la estimación de temperatura de superficie (T_s)

ENTRADA		SALIDA	
VARIABLE	FORMATO	VARIABLE	FORMATO
Imágenes Landsat 8 extraídos de submódulo 1) entrada de datos 2) índices de vegetación	Archivo RST .rst	Imagen temperatura de superficie (T_s)	Archivo RST .rst
Valores constantes previamente guardados en el módulo	Valores numérico		
Metadatos imágenes Landsat 8 extraídos de submódulo 1) entrada de datos	Archivo texto .txt		

6) Radiación de onda larga saliente ($R_{L\uparrow}$)

Tabla 3.25 Entrada y salida de datos para la estimación de radiación de onda larga saliente ($R_{L\uparrow}$)

ENTRADA		SALIDA	
VARIABLE	FORMATO	VARIABLE	FORMATO
Imágenes Landsat 8 extraídos de submódulo 1) entrada de datos 2) índices de vegetación 5) temperatura de superficie	Archivo RST .rst	Emisividad de superficie	Archivo RST .rst
Datos meteorológicos *Temperatura del aire	Valor numérico	Radiación de onda larga saliente ($R_{L\uparrow}$)	

7) Radiación de onda larga entrante ($R_{L\downarrow}$)

Tabla 3.26 Entrada y salida de datos para la estimación de radiación de onda larga entrante ($R_{L\downarrow}$)

ENTRADA		SALIDA	
VARIABLE	FORMATO	VARIABLE	FORMATO
Metadatos imágenes Landsat 8 extraídos de submódulo 1) entrada de datos	Archivo texto .txt	Radiación de onda larga entrante ($R_{L\downarrow}$)	Valor numérico guardado en la memoria interna del módulo
Datos meteorológicos *Temperatura del aire	Valor numérico		

8) Radiación neta (R_n)

Tabla 3.27 Entrada y salida de datos para la estimación de radiación neta (R_n)

ENTRADA		SALIDA	
VARIABLE	FORMATO	VARIABLE	FORMATO
Albedo de superficie	Archivo RST .rst	Imagen Radiación neta	Archivo RST .rst
Radiación de onda larga saliente			
Emisividad de superficie			

9) Evapotranspiración (ET)

Tabla 3.28 Entrada y salida de datos para la estimación de evapotranspiración (ET)

ENTRADA		SALIDA	
VARIABLE	FORMATO	VARIABLE	FORMATO
NDVI	Archivo RST .rst	Imagen Evapotranspiración	Archivo RST .rst
Temperatura de superficie (Ts)			
Radiación neta (Rn)			

4 RESULTADOS Y DISCUSIONES

En este capítulo se presenta a manera de ejemplo/aplicación los resultados obtenidos a partir del procesamiento de las imágenes Landsat 8 correspondientes a las fechas que conforman la base de datos satelital (*Tabla 3.4*) del año 2017 y 2018. Se estimó NDVI, albedo de superficie (α), temperatura de superficie (T_s), radiación neta (R_n) y parámetros secundarios necesarios para la estimación de Evapotranspiración (ET).

4.1 Estimación de los componentes para la estimación de la Evapotranspiración

A continuación, se muestra en forma gráfica el valor observado en la estación Bernal, comparando con el valor estimado por la metodología propuesta en este trabajo, siendo el pixel donde se encuentra la estación (pixel 5) el referente para comparar cada una de las fechas en los años 2017 y 2018.

Se optó por representar de forma gráfica NDVI y albedo de superficie únicamente como valores estimados por la metodología porque no se contó con mediciones para comparar. Por otro lado, para Temperatura de superficie (T_s), radiación neta (R_n) y evapotranspiración (ET) se muestran gráficas comparativas debido a que son elementos que si se tenían en la base de datos Eddy covariance.

4.1.1 Gráfica NDVI estimado por metodología

El NDVI es un valor adimensional, el cual oscila entre $[-1, +1]$ y fue calculado a la hora del paso del satélite ($17:05:00$ UTC ± 2 min; $11:05:00$ hora local) en cada una de las 14 fechas establecidas en la base de datos Eddy covariance.

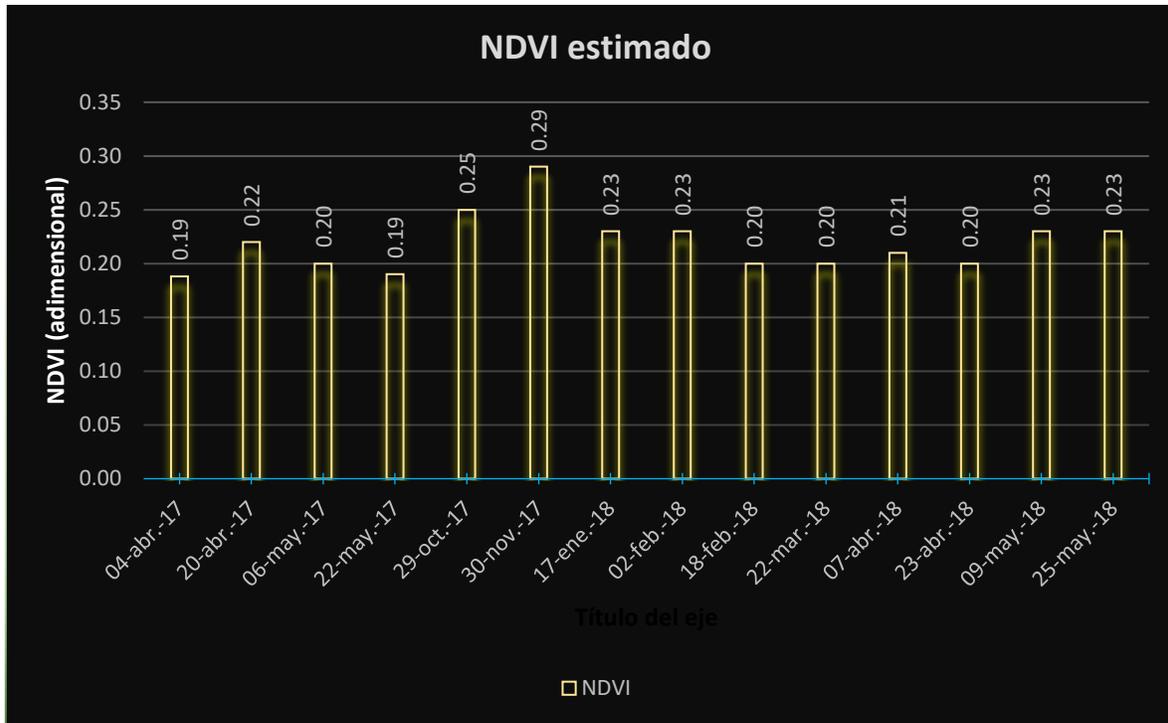


Figura 4.1 Variación temporal de NDVI, valores estimados

En la **Figura 4.1** se muestra la variación temporal de (NDVI), estimada mediante la **Ecuación 3.24**. Cuando el valor de NDVI está próximo a +1 indica abundancia de la vegetación y en muchas ocasiones estas variaciones pueden estar influenciadas por factores naturales o antrópicos. Por ejemplo, un área de bosque resulta en un NDVI más cercano a +1 en comparación con un valor 0 para el suelo desnudo, valores negativos representan cuerpos de agua (bordos, ríos, estanques o presas), aunque también el valor 0 puede representar nubosidad.

Debido a que la estación Bernal se encuentra en una cobertura de matorral, el valor más alto es la sexta fecha (30/noviembre/17) con un valor de 0.29, lejos del valor 1 que representa alta vegetación. Los valores más bajos corresponden a la primera y cuarta fecha (04/abril/17 y 22/mayo/17) con un valor de 0.19. Los patrones y cubiertas vegetales de este tipo de ecosistemas se presentan en islas de fertilidad, y especies herbáceas y arbustivas corresponden a la disponibilidad hídrica.

En la **Tabla 4.1** se muestran los valores máximos, mínimos y promedio para los valores observados y valores estimados en la estación Bernal (pixel 5).

Tabla 4.1 Valores estadísticos de NDVI para valores estimados

NDVI	Máximo	Mínimo	Promedio
estimado	0.29	0.19	0.22

4.1.2 Gráfica albedo estimado por metodología

El (α) es un valor adimensional, el cual oscila entre [0, 1] y fue estimado a la hora del paso del satélite (17:05:00 UTC \pm 2 min; 11:05:00 hora local) en cada una de las 14 fechas establecidas en la base de datos Eddy covariance.

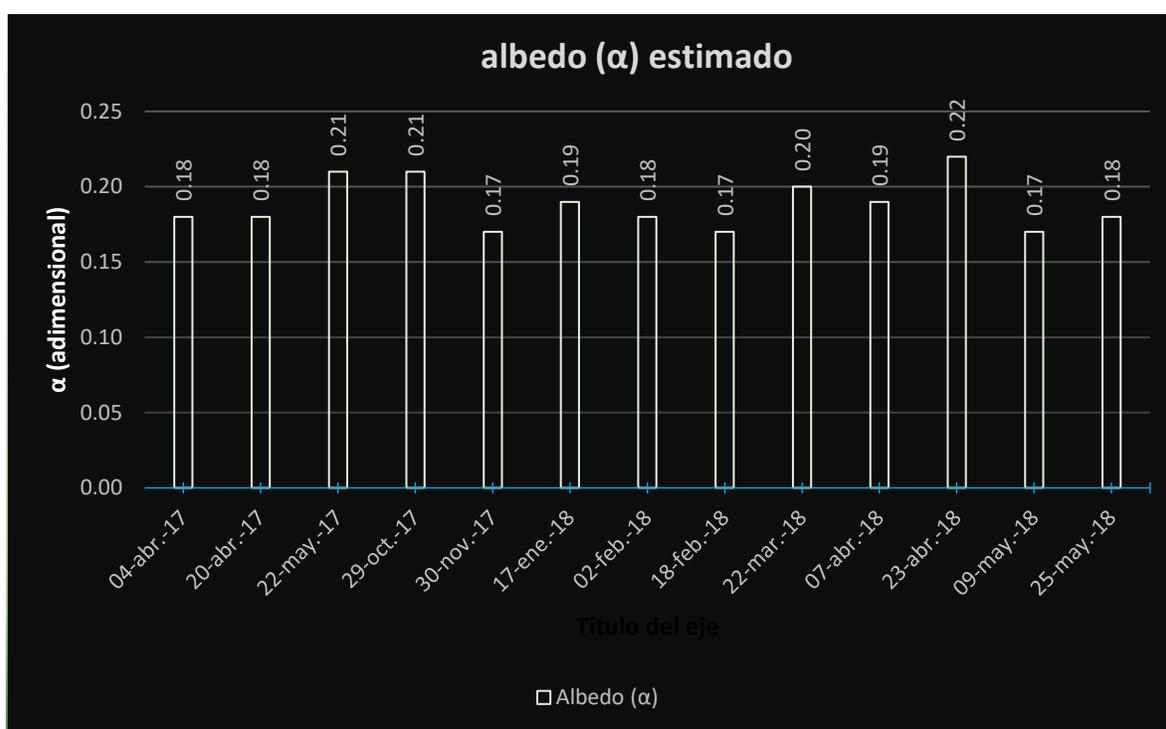


Figura 4.2 Gráfica (α) de valores estimados

En la **Figura 4.2** se muestra la distribución espacial de (α), estimada mediante la **Ecuación 3.7**. Se mide en una escala de 0 correspondiente a un cuerpo negro que absorbe toda la radiación incidente y el valor 1 correspondiente a un cuerpo blanco que refleja toda la radiación.

Un albedo alto enfría el planeta porque la luz (radiación) absorbida y aprovechada para calentarlo es mínima. Por el contrario, un albedo bajo calienta el planeta, porque la mayor parte de la luz es absorbida por el mismo.

El (α) es muy similar en las 14 fechas, presentando una diferencia de 0.05 entre la fecha máxima (23/abril/18) con un valor de 0.22 y mínima (30/noviembre/17, 18/febrero/18 y 09/mayo/18) con un valor de 0.17.

En la **Tabla 4.2** se muestran los valores máximos, mínimos y promedio para los valores observados y valores calculados.

Tabla 4.2 Valores estadísticos de albedo (α) para valores estimados

albedo	Máximo	Mínimo	Promedio
estimado	0.22	0.17	0.19

4.1.3 Temperatura de superficie (T_s) observada vs estimada

En la **Figura 4.3** se graficó la T_s representada en °C para el pixel 5 en las 14 fechas que comprende la base de datos satelital, en ella se compararon los datos observados por la estación Bernal vs los datos estimados con la metodología propuesta.

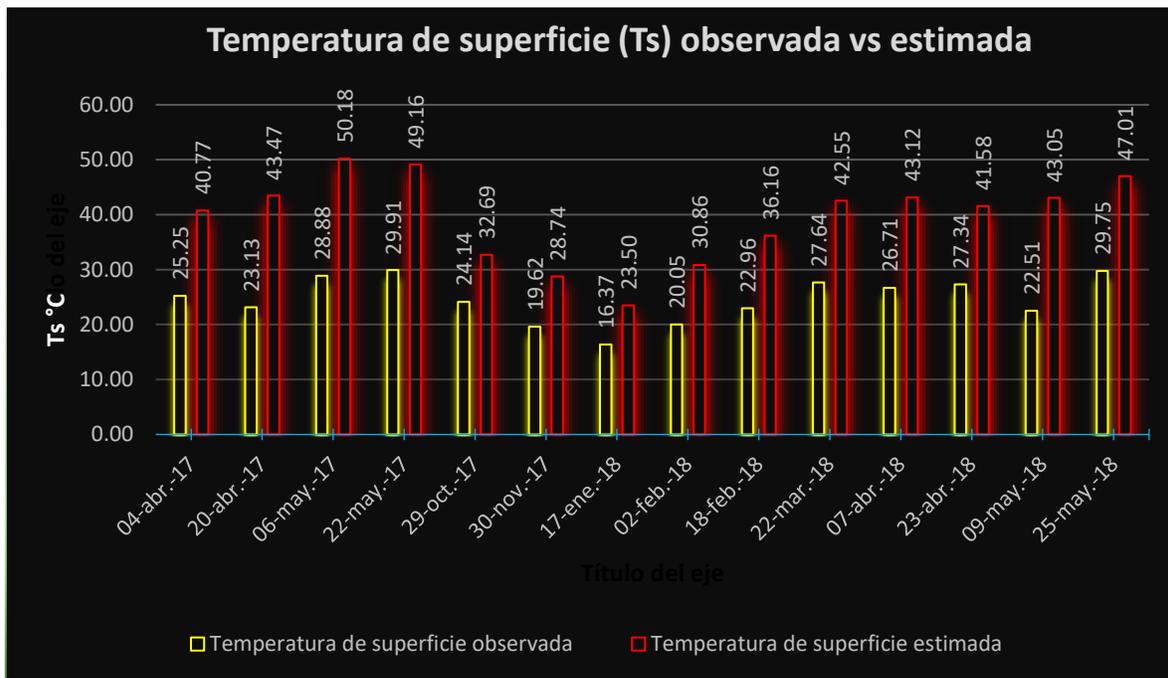


Figura 4.3 Gráfica (T_s) de valores observados vs valores estimados

En la gráfica lo primero que se puede observar es que la metodología está sobreestimando en cada una de las fechas, siendo la tercer fecha (06/mayo/17) la que presenta una diferencia de

21.30 °C siguiéndole de cerca la decimotercera y segunda fecha (09/mayo/18, 20/abril/17) con una diferencia de 20.54 °C y 20.34 °C respectivamente.

Por otra parte, hay tres fechas que la metodología tiene mayor aproximación con lo observado, siendo la séptima (17/enero/18) con una diferencia de 7.13 °C, le sigue la quinta (29/octubre/17) con una diferencia de 8.55 °C y por último la sexta (30/noviembre/17) con una diferencia de 9.12 °C.

En la **Tabla 4.3** se muestran los valores máximos, mínimos y promedio para los valores observados y valores calculados.

Tabla 4.3 Valores estadísticos de Temperatura de superficie (Ts) para valores observados vs estimados

Ts (°C)	Máximo	Mínimo	Promedio
Ts observada	29.91	16.37	24.59
Ts estimada	50.18	23.50	39.49

4.1.4 Radiación neta (Rn) observada vs estimada

En la **Figura 4.4** se graficó la (Rn) en el pixel 5 para las 14 fechas que comprende la base de datos satelital, en ella se compararon los datos observados por la estación Bernal vs los datos estimados con la metodología propuesta.

En la (Rn) observada en las tres primeras fechas (04/abril/17, 20/abril/17, 06/mayo/17) no se tiene registro debido a que la estación Bernal presentó una falla al momento de hacer el registro, sin embargo, debido al número reducido de fechas que se tienen para el año 2017, se consideró importante dejar esas fechas para los parámetros que si se pueden comparar en un futuro.

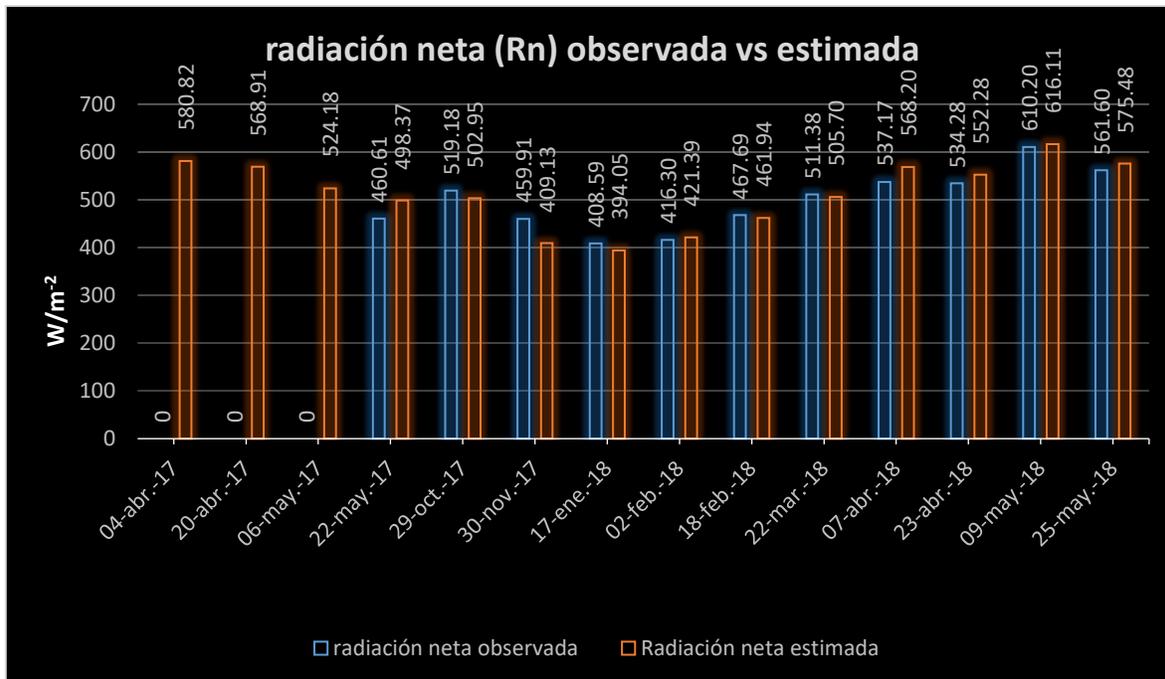


Figura 4.4 Gráfica (Rn) de valores observados vs valores estimados

La comparación de la cuarta fecha (22/mayo/17) es la que presenta mayor diferencia, debido que la metodología obtuvo una diferencia positiva (sobreestimando) con respecto a lo observado, con 37.76 W m^{-2} , otra fecha que la metodología tuvo una diferencia considerable fue la onceava fecha (07/abril/18) que presentó una sobreestimación de 31.03 W m^{-2} . La sexta fecha (30/noviembre/17) es la que presenta mayor diferencia negativa (subestimando) con 50.78 W m^{-2} .

En la **Tabla 4.4** se muestran los valores máximos, mínimos y promedio para los valores observados y valores estimados.

Tabla 4.4 Valores estadísticos de Radiación neta (Rn) para valores observados vs estimados

Rn (Wm ⁻²)	Máximo	Mínimo	Promedio
Rn observada	610.20	408.59	498.81
Rn estimada	616.11	394.05	513.05

4.1.5 Evapotranspiración (ET) observada vs estimada

En la **Figura 4.5** se graficó la (ET) en el pixel 5 para las 14 fechas que comprende la base de datos satelital, en ella se comparan los datos observados por la estación Bernal vs los datos estimados con la metodología propuesta.

La ET es expresada en mm día^{-1} , el cual para la zona de estudio oscila entre [4.0 - 8.3] y fue estimada a la hora del paso del satélite (17:05:00 UTC \pm 2 min; 11:05:00 hora local) en cada una de las 14 fechas establecidas en la base de datos Eddy covariance.

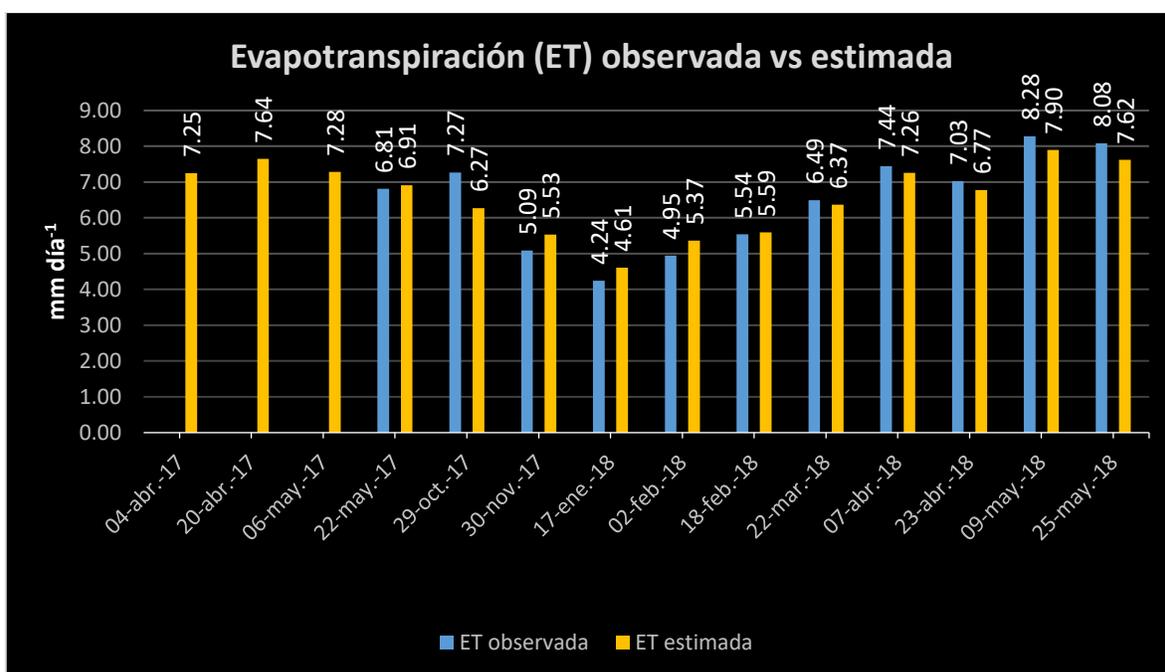


Figura 4.5 Gráfica (ET) de valores observados vs valores estimados

En la ET observada en las tres primeras fechas (04/abril/17, 20/abril/17, 06/mayo/17) no se tiene registro debido a que la estación Bernal presentó una falla al momento de hacer el registro, sin embargo, debido al número reducido de fechas que se tienen para el año 2017, se consideró importante dejar esas fechas para los parámetros que si se pueden comparar en un futuro.

La comparación de la quinta fecha (29/octubre/17) es la que presenta mayor diferencia, debido que la metodología obtuvo una diferencia negativa (subestimando) con respecto a lo

observado, con 1.00 mm día⁻¹. La decimocuarta fecha (25/mayo/18) es la siguiente con mayor diferencia negativa (subestimando) con 0.46 mm día⁻¹.

En general la metodología propuesta presentó un comportamiento similar a los valores observados obteniendo diferencias muy bajas comprobando que es posible estimar ET con imágenes de satélite ahorrando recursos y tiempo.

En la **Tabla 4.5** se muestran los valores máximos, mínimos y promedio para los valores observados y valores estimados.

Tabla 4.5 Valores estadísticos de Evapotranspiración (ET) para valores observados vs estimados

ET (mm día⁻¹)	Máximo	Mínimo	Promedio
ET observada	8.27	4.24	6.19
ET estimada	7.89	4.61	6.51

4.2 Validación

En esta sección se observa la relación 1:1 de los valores estimados y observados en la estación Bernal. Para el caso de temperatura de superficie los sensores se encuentran a 20 cm de profundidad, por lo que los valores no pueden ser comparados de forma directa con la LST. Sin embargo, es importante que los valores de Ts (LST) calculados por el algoritmo Split-Window reproduce el comportamiento temporal y espacial de la temperatura del suelo. Y aunque no se logró tener fechas representativas de cada mes si se puede inferir el comportamiento de la temperatura a lo largo del año. Se aprecia que en temporada de seca los valores se incrementan, en tanto que conforme avanza la temporada de lluvias los valores disminuyen.

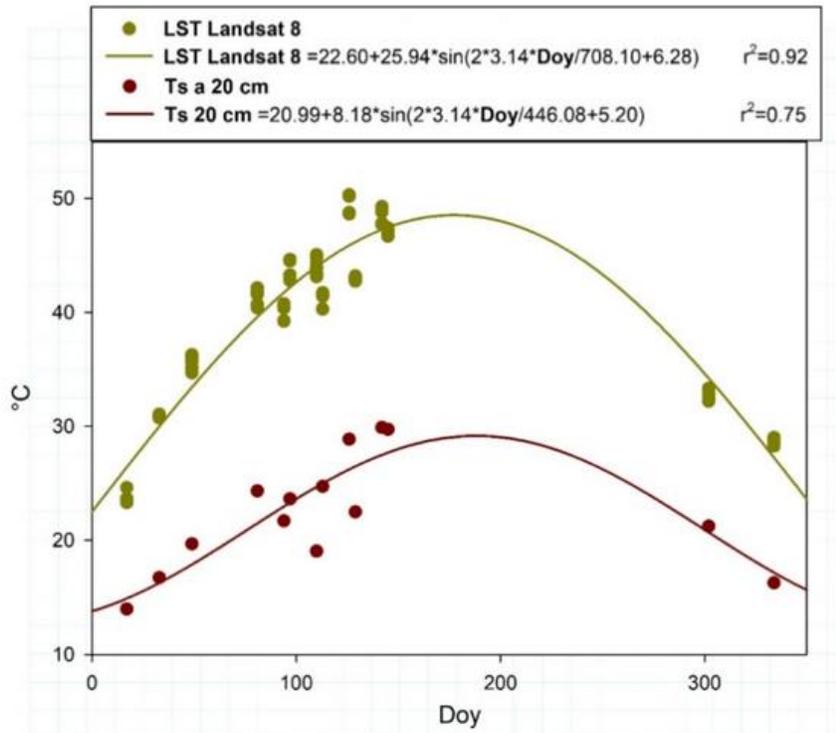


Figura 4.6 Valores 1:1 LST Landsat 8 y valores 1:1 Ts a 20 cm

Se muestra la gráfica de dispersión entre la temperatura de superficie a 20 cm y la temperatura de superficie estimada con imágenes Landsat 8. Para el análisis se seleccionaron las 14 fechas como puntos muestrales obtenidos dentro de la zona de estudio.

La gráfica de dispersión entre los valores de temperatura de superficie a 20 cm y la temperatura de superficie estimada con imágenes Landsat 8 el diagrama de dispersión muestra buena correlación entre ambas variables en las fechas de estudio.

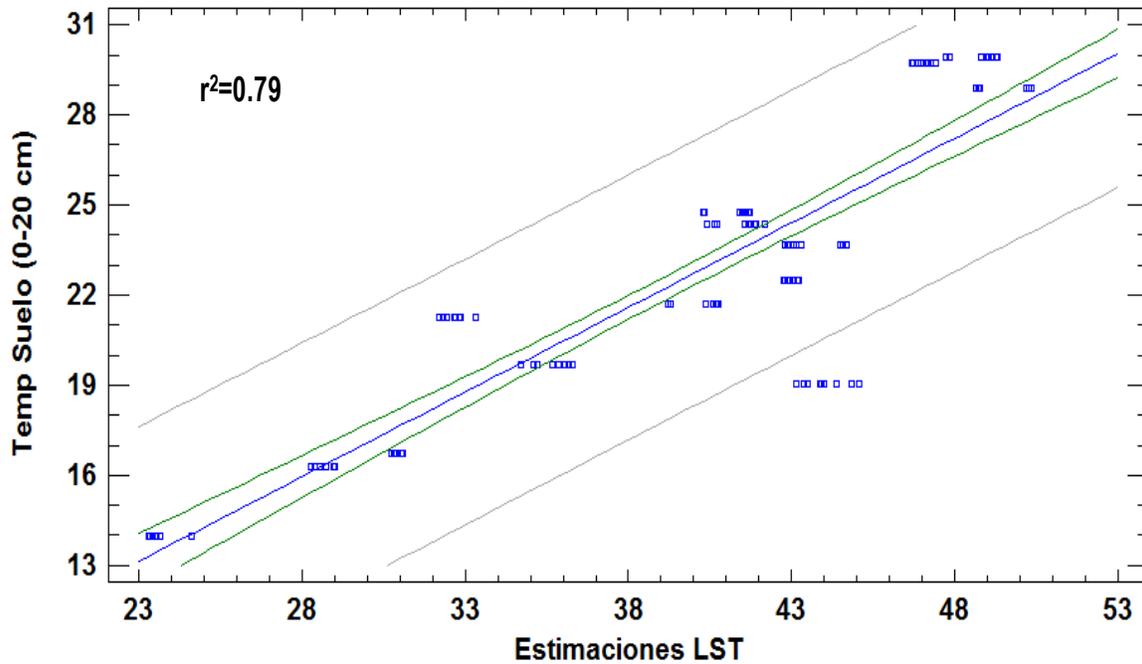


Figura 4.7 Gráfica de dispersión temperatura de suelo 20 cm vs temperatura de suelo estimada con imágenes Landsat 8

Para Rn y ET las estimaciones realizadas si pueden ser comparadas con los datos observados en la estación Bernal. Para Rn (**Figura 4.8**) se puede apreciar una muy buena predicción del modelo ($NSE=0.77$) con un RMSE de 22.27 W m^{-2} . Finalmente, para la ET (**Figura 4.9**) la predicción fue muy buena ($NSE= 0.82$) con un RMSE de 0.42 mm día^{-1} , sin embargo, es importante señalar que el error es más pronunciado en invierno y llega a ser mejor en las demás estaciones (**Tabla 4.6**).

Tabla 4.6 Criterios de eficiencia (Waseem et al., 2017)

Nivel de desempeño	NSE
Muy bueno	$0.75 < NSE > 1$
Bueno	$0.65 < NSE > 0.75$
Satisfactorio	$0.5 < NSE > 0.65$
Insatisfactorio	$NSE \leq 0.5$

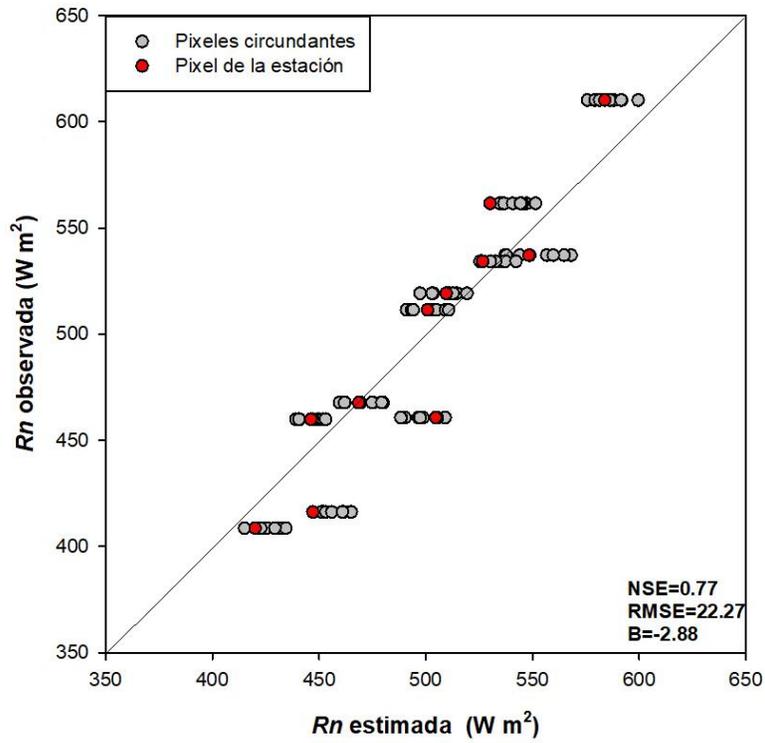


Figura 4.8 Observados vs Estimados de Radiación neta

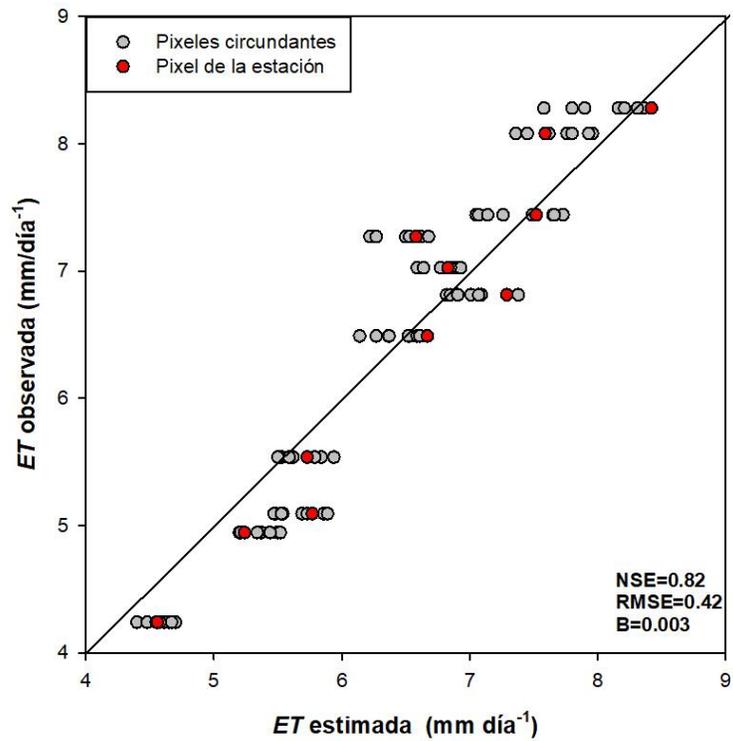


Figura 4.9 Observados vs Estimados de Evapotranspiración

4.3 Automatización

Una vez establecida y validada la metodología se procedió a la implementación del módulo geomático, para esta investigación se realizó utilizando el sistema de información geográfica TerrSet; esto es posible gracias a que el IITCA cuenta con un convenio de colaboración entre la Universidad Autónoma del Estado de México (UAEMéx) y Clark Labs, existiendo la posibilidad de incluir el módulo propuesto en una futura edición del SIG (junto con el resto de módulos para la gestión integrada del agua), además de su bajo costo monetario con respecto a otros programas de SIG privativos.

Desde el punto de vista de programación, TerrSet permite utilizar aplicaciones personalizadas para acceder a las funciones y módulos necesarios en la implementación, creadas con instrucciones en el lenguaje de programación como son: Pascal, Python Visual C++, Visual Basic for Applications (VBA).

Se utilizó el entorno de desarrollo integrado (Integrated Development Environment, IDE) Delphi 2010 también conocido como Delphi 14 porque con éste es desarrollado TerrSet, además opera bajo un esquema de Programación Orientada a Objetos (POO). La conexión entre TerrSet y Delphi se realiza mediante la interfaz de programación de aplicaciones (Applications Programming Interface, API), la cual permite escribir instrucciones en Delphi para invocar funciones que ejecutan los comandos de TerrSet y combinarlas con instrucciones y funciones típicas de Delphi, las cuales son creadas para el empleo y manipulación de datos, objetos y archivos dentro de una aplicación.

Interfaz del módulo hidrogeomático

El módulo geomático denominado **TMFREE** (**T**errSet **M**odule **FoR** **E**vapotranspiration **E**stimation through Landsat 8) (*Figura 4.10*) fue incorporado al software TerrSet en el menú “IDRISI GIS Analysis” y dentro de los submenús “Integrated Water Management” el cual es desarrollado por el grupo de investigadores del Laboratorio de hidrogeomática del IITCA y “Environmental aspects”. A continuación, se muestran la ruta para llegar al módulo desarrollado.

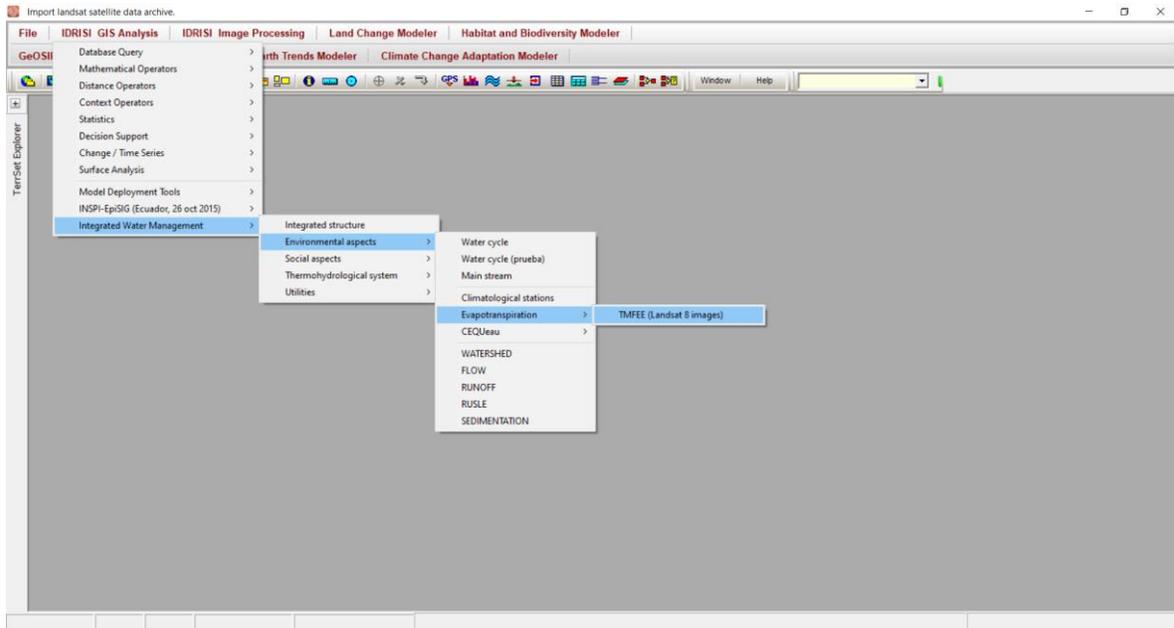


Figura 4.10 Incorporación del módulo TMFREE al software TerrSet

VENTANA PRINCIPAL

Para el diseño de la ventana principal, se retoma el esquema del diagrama general (*Figura 3.17*), esquematizando los submódulos desarrollados para el módulo TMFREE, cabe hacer la aclaración que dicha interfaz garantiza la incorporación de más submódulos a futuro.

La interfaz del menú “TMFREE” (*Figura 4.11*) esquematiza los submódulos correspondientes a la estimación de la ET, índices de vegetación, temperatura de superficie y de los componentes de Rn (albedo, radiación de onda corta entrante, radiación de onda larga entrante, radiación de onda larga saliente, emisividad de superficie). El módulo TMFREE cuenta con un manual de usuario que estará disponible en la sección ayuda.

La ventana principal esquematiza todos los submódulos que fueron desarrollados en esta investigación con la finalidad de que los usuarios tengan la idea general de los procesos que pueden ser generados.

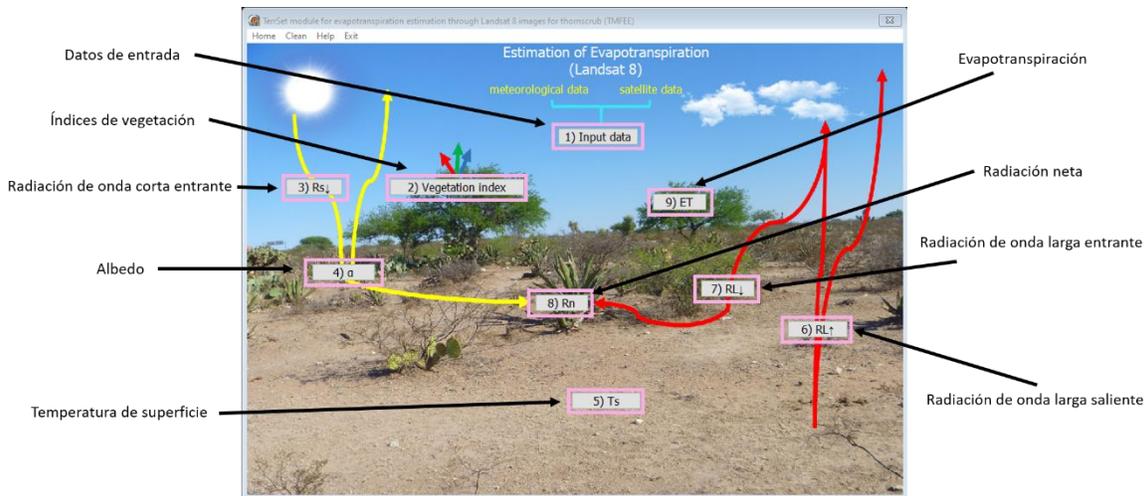


Figura 4.11 Ventana principal del módulo TMFREE

1) DATOS DE ENTRADA

La ventana para ingresar los datos de entrada (**Figura 4.12**) está compuesta con la entrada de tres tipos de datos, el primero, es el archivo metadatos MLT con extensión “.txt” (archivo de texto) que viene en el compendio de imágenes que fueron descargadas; el segundo, el ingreso de datos meteorológicos específicos de la zona de estudio; el tercero, es la entrada de imágenes Landsat 8 tipo raster extensión .rst para finalmente iniciar el pre-procesamiento interno de las imágenes Landsat 8.

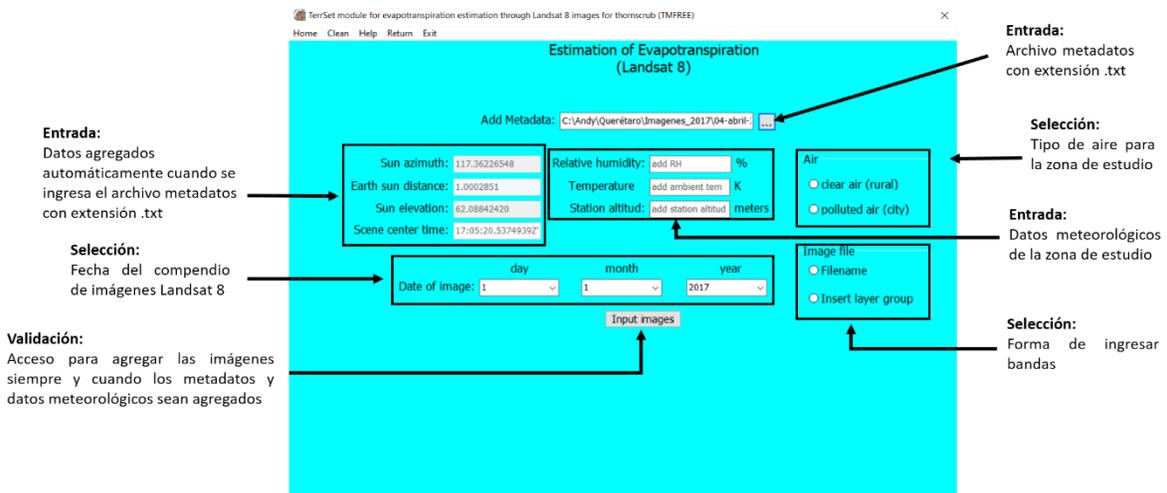


Figura 4.12 Ventana para datos de entrada

Si se elige la entrada de imágenes banda por banda la interfaz despliega 9 casillas para ingresar la banda que sirve para completar el pre-procesamiento.

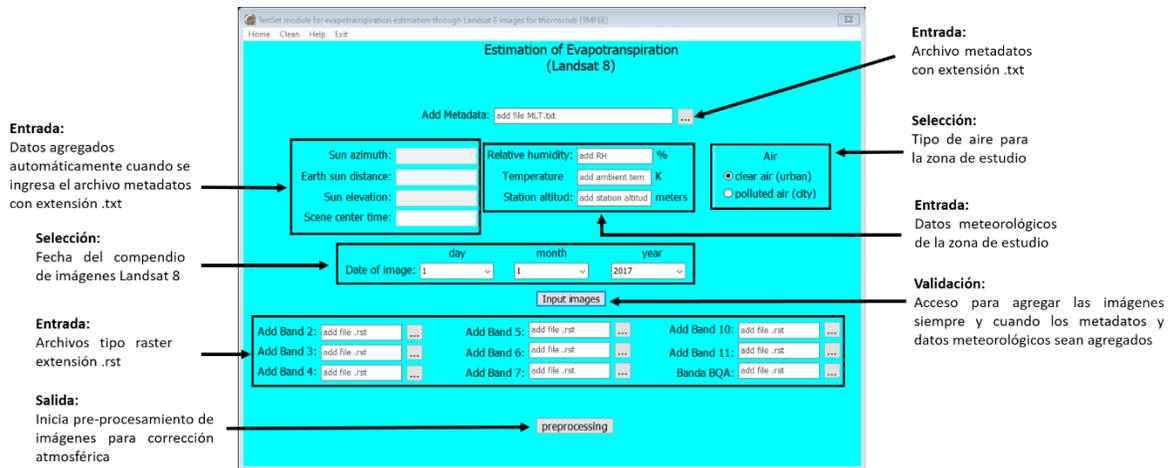


Figura 4.13 Ventana para ingresar banda por banda

Si se elige la entrada de imágenes mediante un grupo raster la interfaz despliega 1 casilla para ingresar las 9 bandas en grupo que sirve para completar el pre-procesamiento.

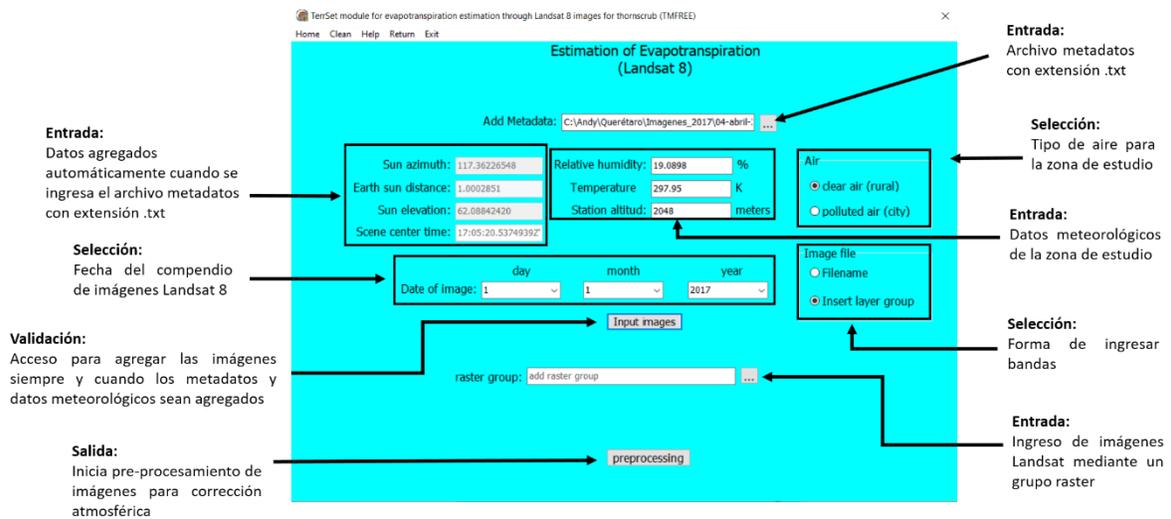


Figura 4.14 Ventana para ingresar bandas por medio de un grupo raster

2) Índices de vegetación

La ventana para estimar los índices de vegetación (**Figura 4.15**) integra tres casillas para colocar el nombre de salida de (NDVI, SAVI, LAI), teniendo como resultado tres imágenes con formato “.rst”.

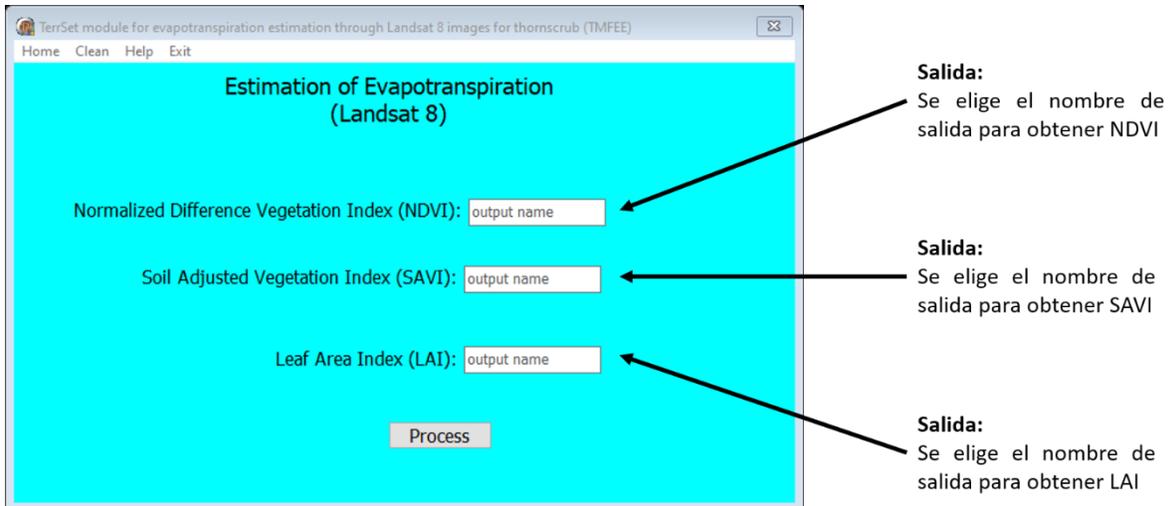


Figura 4.15 Ventana para la estimación de índices de vegetación

3) Radiación de onda corta entrante

En el botón de $R_{S\downarrow}$ se genera un proceso con salida numérica, la estimación de Radiación de onda corta entrante (**Figura 4.16**). El resultado es guardado en la memoria del submódulo para ser utilizados para completar el ciclo y llegar a la estimación de ET.

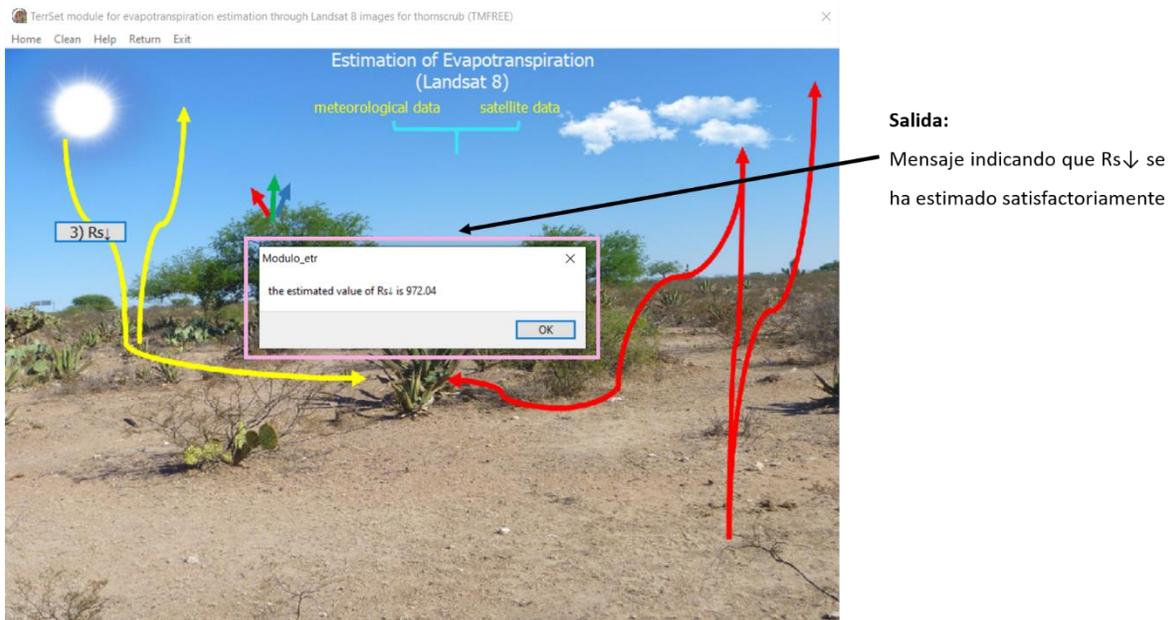
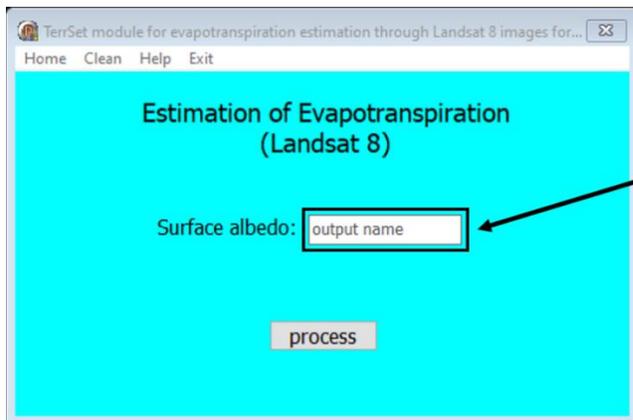


Figura 4.16 Ventana para la estimación de radiación de onda corta entrante

4) Albedo de superficie

La ventana para estimar albedo de superficie (*Figura 4.17*) integra una casilla para colocar el nombre de salida teniendo como resultado una imagen con formato “.rst”.



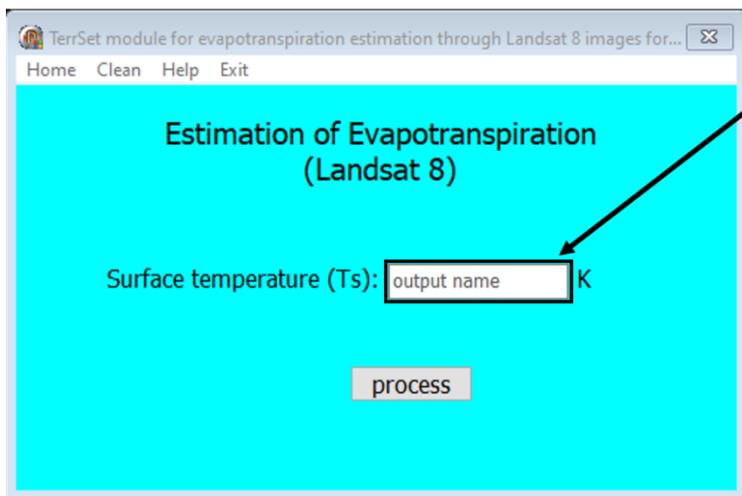
Salida:

Nombre de salida para generar el archivo .rst de Albedo de superficie

Figura 4.17 Ventana para la estimación de albedo de superficie

5) Temperatura de superficie

La ventana para estimar temperatura de superficie (*Figura 4.18*) integra una casilla para colocar el nombre de salida teniendo como resultado una imagen con formato “.rst”.



Salida:

Nombre de salida para generar el archivo .rst de Temperatura de superficie

Figura 4.18 Ventana para la estimación de temperatura de superficie

6) Radiación de onda larga saliente

La ventana para estimar radiación de onda larga saliente (*Figura 4.17*) integra dos casillas, la primera es la estimación de $R_{L\uparrow}$ y la segunda estima la emisividad de superficie a fin de colocar el nombre de salida teniendo como resultado dos imágenes con formato “.rst”.

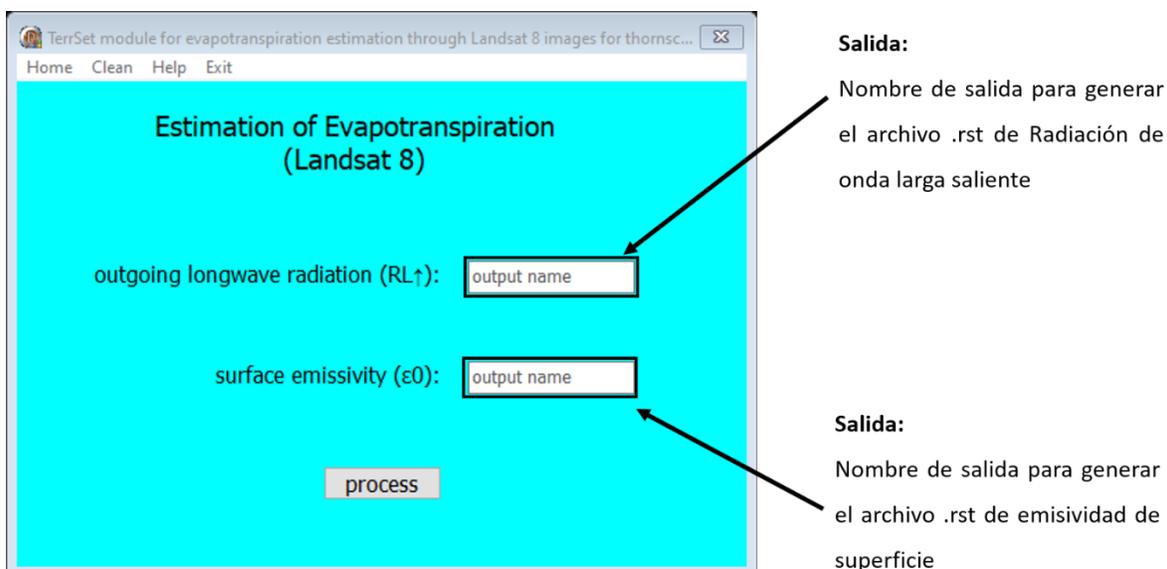
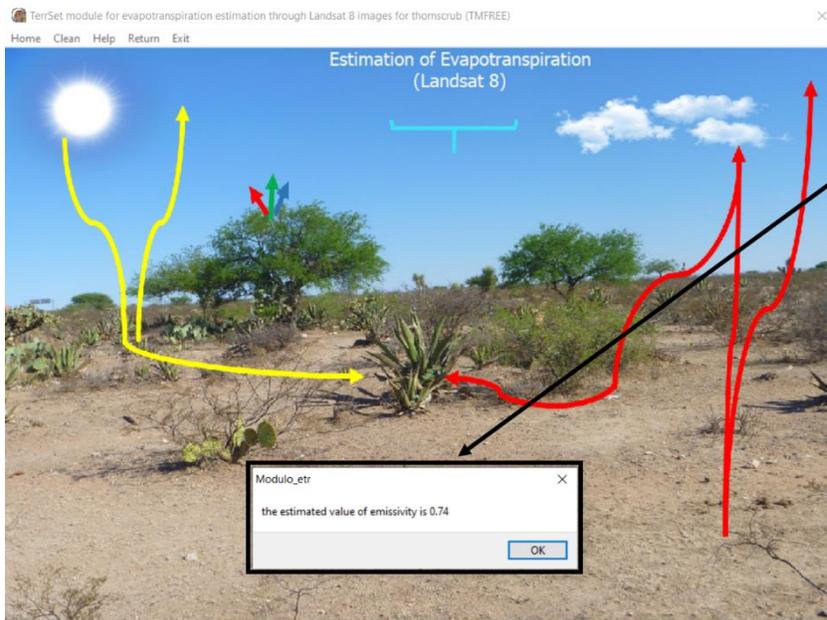


Figura 4.19 Ventana para la estimación de radiación de onda larga saliente

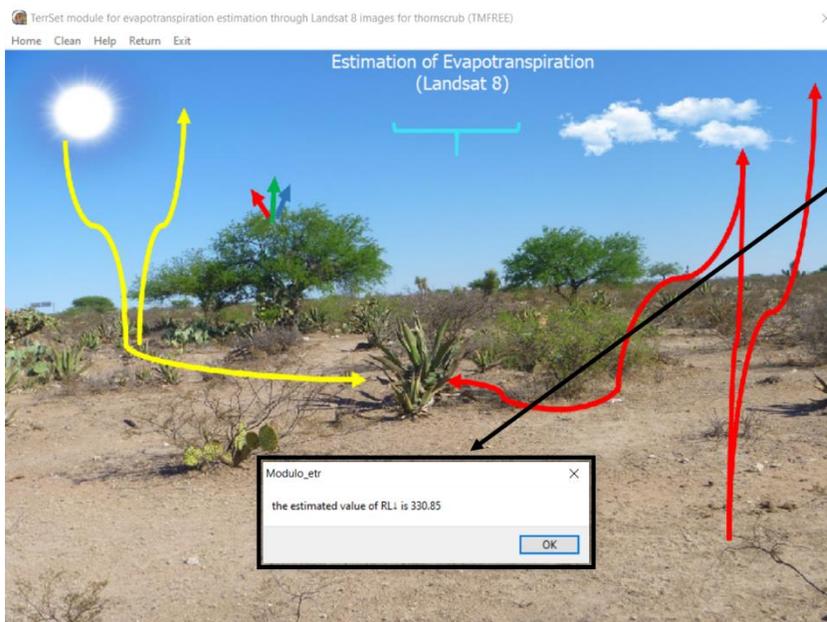
7) Radiación de onda larga entrante

En el botón de $R_{L\downarrow}$ se generan dos procesos con salida numérica, el primero es la estimación de emisividad atmosférica (*Figura 4.18*) y el segundo es la estimación de $R_{L\downarrow}$ (*Figura 4.19*). Ambos resultados se guardan en la memoria del submódulo para ser utilizados en procesos posteriores y llegar a la estimación de ET.



Salida:
Mensaje indicando que
emisividad se ha estimado
satisfactoriamente

Figura 4.20 Ventana para la estimación de emisividad



Salida:
Mensaje indicando que
Radiación de onda larga
entrante se ha estimado
satisfactoriamente de
forma numérica

Figura 4.21 Ventana para la estimación de radiación de onda larga entrante

8) Radiación neta

La Radiación neta se estima de acuerdo a la fórmula propuesta por Allen et al., (2002) la cual permite elegir al usuario tres elementos (albedo de superficie, radiación de onda larga saliente, emisividad de superficie) previamente estimados, así como colocar el nombre de salida para el componente del balance de energía, radiación neta como se muestra en la ventana (*Figura 4.20*).

Entrada: Archivo correspondiente al albedo con extensión .rst

Entrada: Archivo correspondiente a la radiación de onda larga saliente con extensión .rst

Entrada: Archivo correspondiente a la emisividad de superficie con extensión .rst

Salida: Nombre de salida para generar el archivo correspondiente a la radiación neta con extensión .rst

Proceso: Botón que inicia el proceso para estimar el archivo correspondiente a la radiación neta con extensión .rst

Figura 4.22 Ventana para la estimación de radiación neta

9) Evapotranspiración

La ventana para estimar evapotranspiración (*Figura 4.21*) es el final del ciclo por lo cual es la integración de imágenes “.rst” estimadas anteriormente, por lo cual necesitó tres imágenes de entrada (NDVI, Ts, Rn). La cuarta casilla sirvió para colocar el nombre de salida teniendo como resultado una imagen con formato “.rst”.

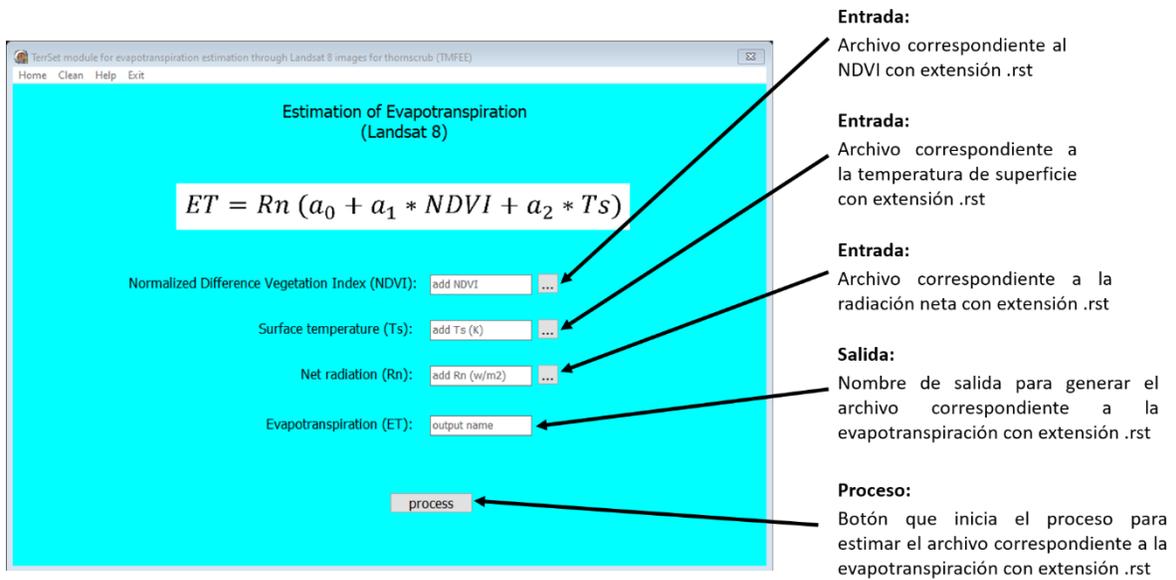


Figura 4.23 Ventana para la estimación de evapotranspiración

10) Ciclo para la estimación de evapotranspiración

Para que el usuario pueda identificar en que parte del proceso está, se coloca el símbolo check ✓ en cada submódulo que se va completando hasta finalizar el ciclo (**Figura 4.22**). A partir de este momento el usuario elige si desea limpiar la interfaz para estimar los componentes con una fecha diferente o cerrar el módulo.

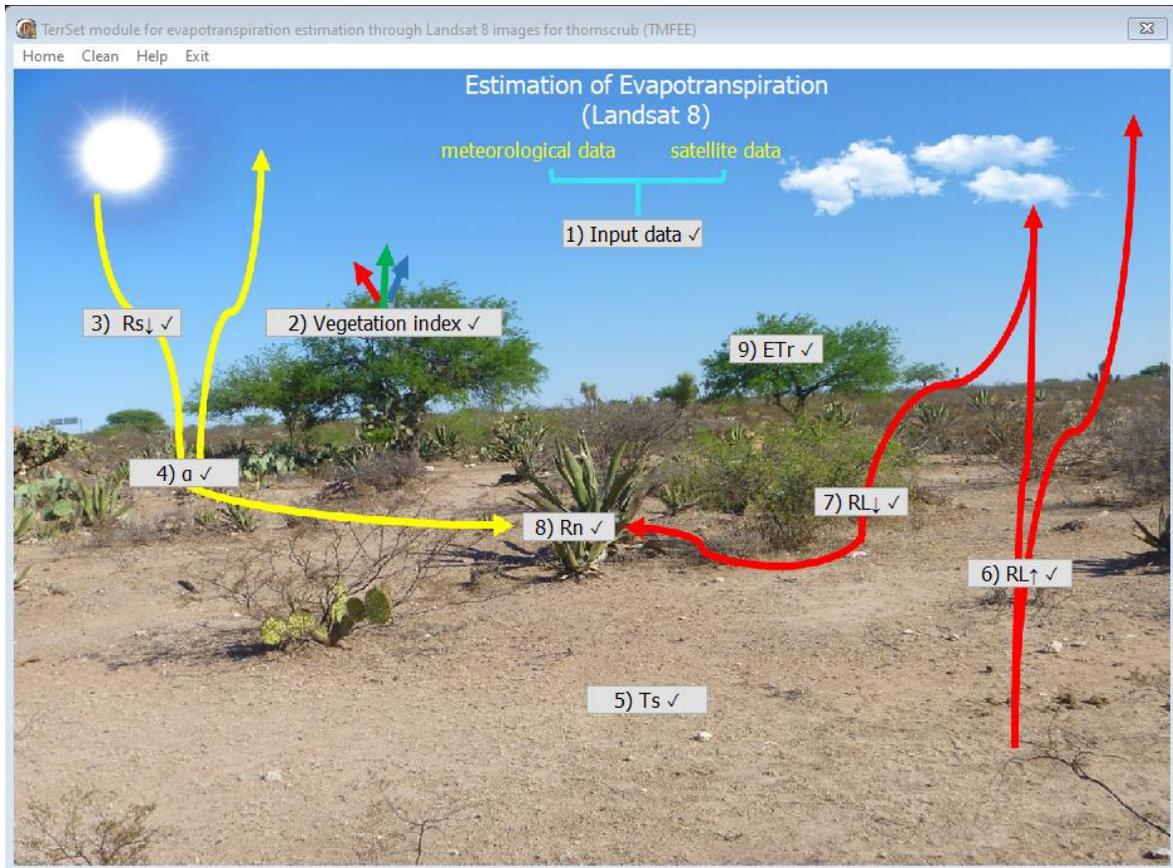


Figura 4.24 Ventana principal al terminar el ciclo de estimación

4.4 Mapas distribución de componentes (Porción de Querétaro)

Se presentan los resultados obtenidos a partir del procesamiento de las imágenes Landsat 8 correspondientes a la fecha del 4 de abril del 2017. Se estimaron las variables de entrada necesarias para aplicar la metodología como: índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), albedo de superficie (α) y temperatura de superficie (T_s). Posteriormente fue estimada la radiación neta (R_n) y finalmente la evapotranspiración (ET).

4.4.1 Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)

En la **Figura 4.25** se muestra la distribución espacial del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) en la zona de estudio, Querétaro. Esta imagen fue estimada a partir de la reflectancia en la región infrarroja cercana y la región roja visible del espectro electromagnético, banda 4 y banda 5 respectivamente. El rango de valores oscila entre [-1 a 1]. Los resultados obtenidos a partir de los valores de NDVI para la fecha 04/abril/2017 se encuentran entre [-0.9 a 0.9].

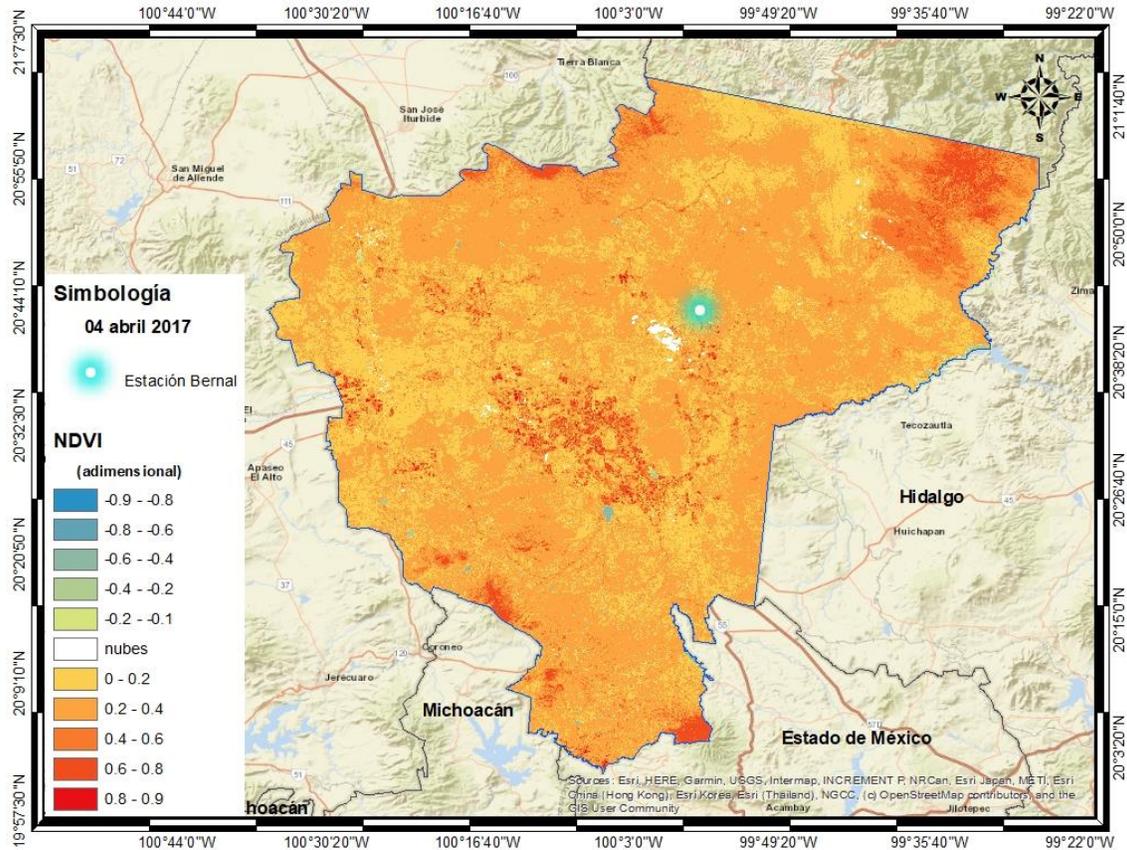


Figura 4.25 Distribución espacial del (NDVI) correspondiente a la fecha 04 de abril de 2017

En la **Tabla 4.7** se muestra el valor de (NDVI) en la estación Bernal, el albedo oscila entre -1 y 1. Por lo tanto, los valores obtenidos se encuentran en el rango con los valores esperados. Estos valores corresponden a valores instantáneos registrados para el tiempo de paso del satélite.

Tabla 4.7 Valor del (NDVI) correspondiente a la fecha 04 de abril del 2017

Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI)	
<i>Rango inicial</i>	<i>Rango final</i>
-1	1
Valor de la estación (matorral)	
0.19	

4.4.2 Albedo de superficie

En la **Figura 4.26** se muestra la distribución espacial del albedo de superficie (α) en la zona de estudio, Querétaro. El rango de valores oscila entre [0 a 1]. Los resultados obtenidos a partir de los valores de α para la fecha 04/abril/2017 se encuentran entre [0.01 a 1].

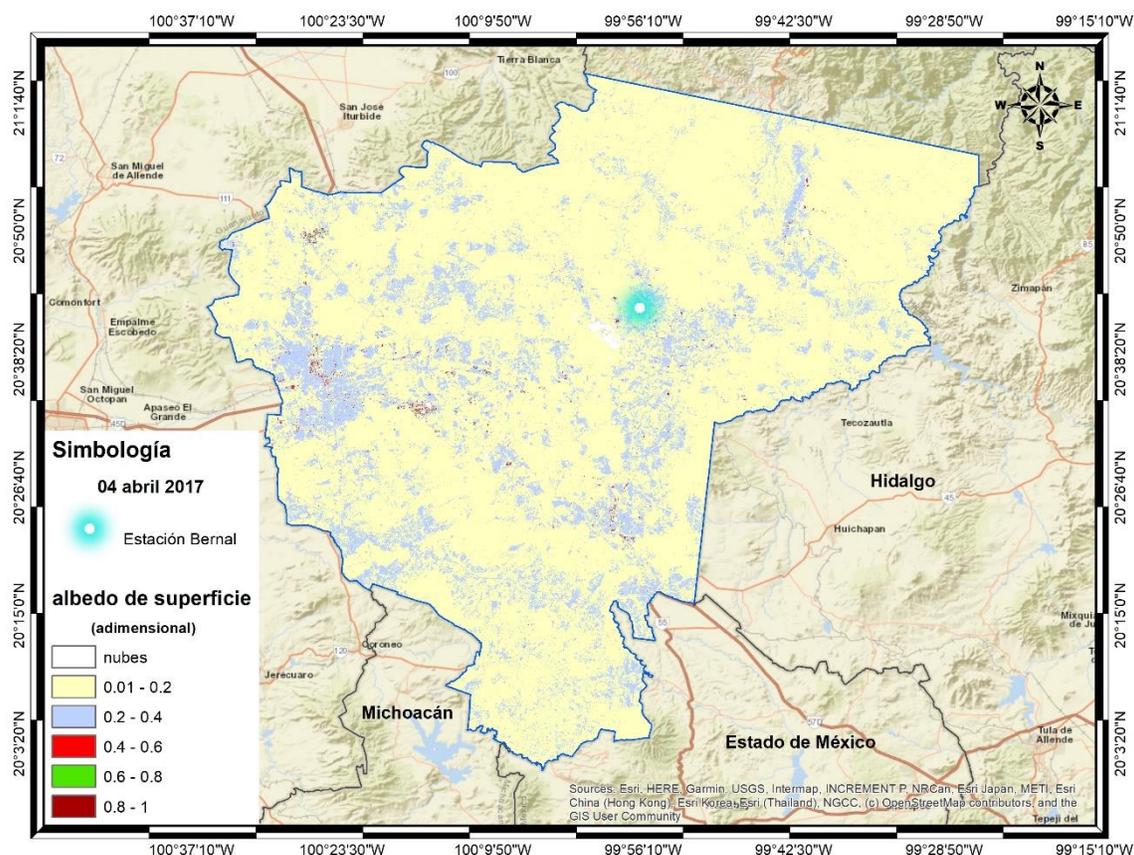


Figura 4.26 Distribución espacial del albedo de superficie (α) correspondiente a la fecha 04 de abril de 2017

En la **Tabla 4.8** se muestra el valor de (α) en la estación Bernal, el albedo oscila entre 0 y 1. Por lo tanto, los valores obtenidos se encuentran en el rango con los valores esperados. Estos valores corresponden a valores instantáneos registrados para el tiempo de paso del satélite.

Tabla 4.8 Valor de albedo de superficie (α) correspondiente a la fecha 04 de abril del 2017

Albedo de superficie (α)	
Rango inicial	Rango final
0	1
Valor de la estación (matorral)	
0.18	

4.4.3 Temperatura de superficie

En la **Figura 4.27** se muestra la distribución espacial de temperatura de superficie (T_s) en la zona de estudio, Querétaro. El rango de valores oscila entre [0 a 60].

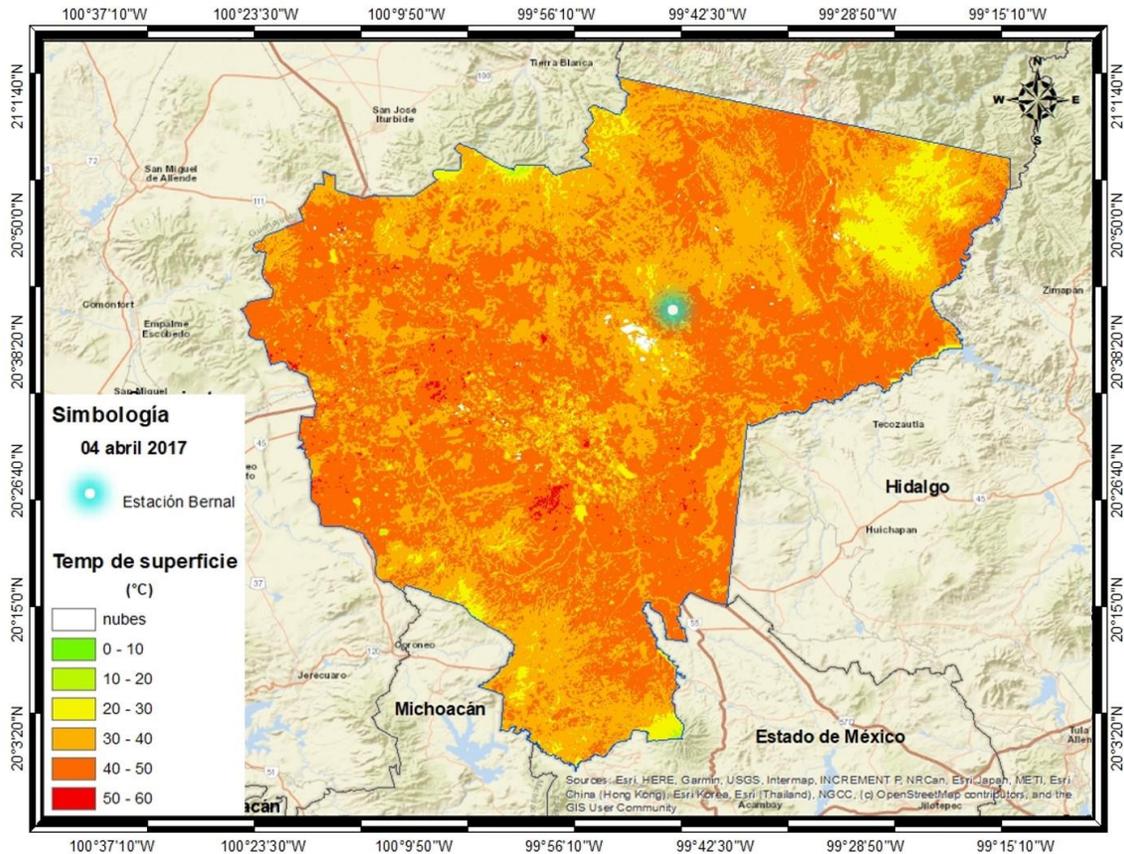


Figura 4.27 Distribución espacial de la temperatura de superficie (T_s) correspondiente a la fecha 04 de abril de 2017

En la **Tabla 4.9** se muestra el valor de (T_s) en la estación Bernal, la temperatura de superficie oscila entre 0 y 60 (°C). Por lo tanto, los valores obtenidos se encuentran en el rango con los valores esperados. En la **Figura 4.27**, se observa que los valores más altos de T_s se encuentran en pixeles de poca vegetación.

Estos valores corresponden a valores instantáneos registrados para el tiempo de paso del satélite.

Tabla 4.9 Valor de temperatura de superficie (T_s) correspondiente a la fecha 04 de abril del 2017

Temperatura de superficie (T_s)	
Rango inicial	Rango final
0	60
Valor de la estación (matorral)	
40.77	

4.4.4 Radiación neta

En la **Figura 4.28** donde se observa la distribución espacial de R_n estimada mediante la **Ecuación 3.6**. Los resultados obtenidos a partir de los valores puntuales extraídos dentro de la zona semiárida de Querétaro muestran que la R_n para la fecha del 04/abril/17 oscila entre [0.01 a 872 Wm^{-2}].

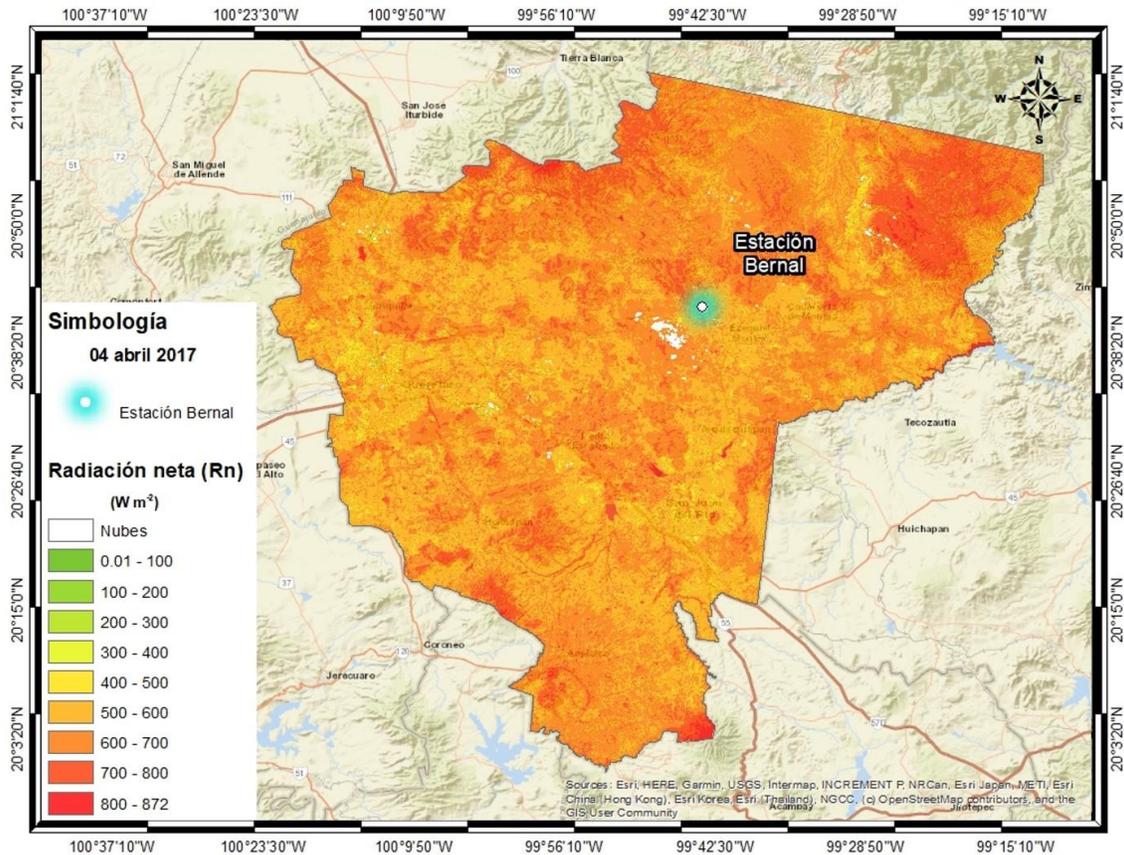


Figura 4.28 Distribución espacial de la Radiación neta (R_n) correspondiente a la fecha 04 de abril de 2017

En la **Tabla 4.10** se muestra el valor de (R_n) en la estación Bernal. De acuerdo con Allen et al., (2002), la radiación neta oscila entre 100 y 700 (Wm^{-2}). Por lo tanto, los valores

obtenidos se encuentran en el rango con los valores esperados. En la **Figura 4.28**, se observa que los valores más altos de R_n se encuentran en pixeles de bosque. Estos valores corresponden a valores instantáneos registrados para el tiempo de paso del satélite.

Tabla 4.10 Valor de Radiación neta (R_n) correspondiente a la fecha 29 de octubre de 2017

Radiación neta (R_n)	
Rango inicial promedio diario	Rango final promedio diario
180	875
Valor de la estación (matorral)	
580.82	

4.4.5 Evapotranspiración

En la **Figura 4.29** se muestra la distribución espacial de la ET en la zona de estudio en el estado de Querétaro estimado mediante la **Ecuación 3.1**.

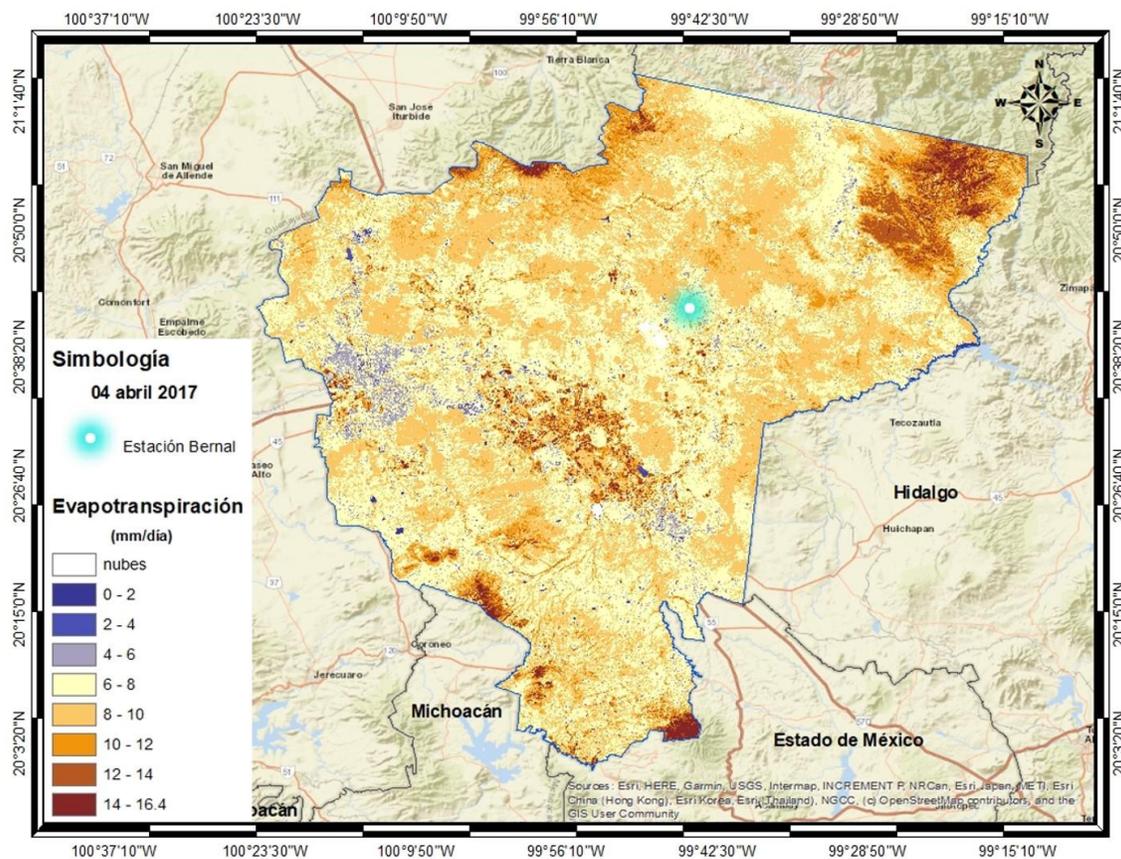


Figura 4.29 Distribución espacial de la evapotranspiración (ET) correspondiente a la fecha 04 de abril de 2017

Esta imagen corresponde a la fecha 04/abril/2017. La **Tabla 4.11** muestra el rango inicial y el final del mapa. Los resultados obtenidos a partir de los valores puntuales extraídos en la zona de estudio los valores de ET oscilan entre [0 a 16.4 mm día⁻¹]. La estimación obtenida a partir de los valores de ET para la fecha 04/abril/2017 es [7.25 mm día⁻¹]. Por lo tanto, los valores obtenidos se encuentran en el rango con los valores esperados.

Los datos muestran que para aquellas zonas con suelo seco o suelo con baja cobertura vegetal (0 – 6 mm día⁻¹), los valores de ET son bajos. Por otro lado, los valores más altos de ET (10 – 16 mm día⁻¹) corresponden a zonas cubiertas de vegetación o pastizales.

Estos valores corresponden a valores instantáneos registrados para el tiempo de paso del satélite.

Tabla 4.11 Valor de evapotranspiración (ET) correspondiente a la fecha 29 de octubre de 2017

Evapotranspiración (ET)	
<i>Rango inicial promedio diurno</i>	<i>Rango final promedio diurno</i>
0	16.4
Valor de la estación (matorral)	
7.25	

A continuación, se muestran los mapas de distribución de ET (**Figura 4.30**) para la hora de paso del satélite (11:00 am) para cada una de las escenas Landsat 8 con información propia de la estación Bernal aplicando la metodología con el módulo TMFREE. Los valores más altos se encuentran en zonas boscosas, en tanto que los valores más bajos se ubican para zonas urbanas y de suelo con poca vegetación.

Tomando como referencia los datos puntuales de la estimación de ET para cada fecha (**Figura 4.5**). Es importante mencionar que debido a la baja disponibilidad de imágenes no se tienen todos los meses del año, sin embargo, los resultados muestran que los valores a nivel pixel concuerdan con la distribución espacial considerando variación espacial y temporal de cada sitio y uso de suelo. Por lo que se puede considerar factible la estimación por métodos satelitales.

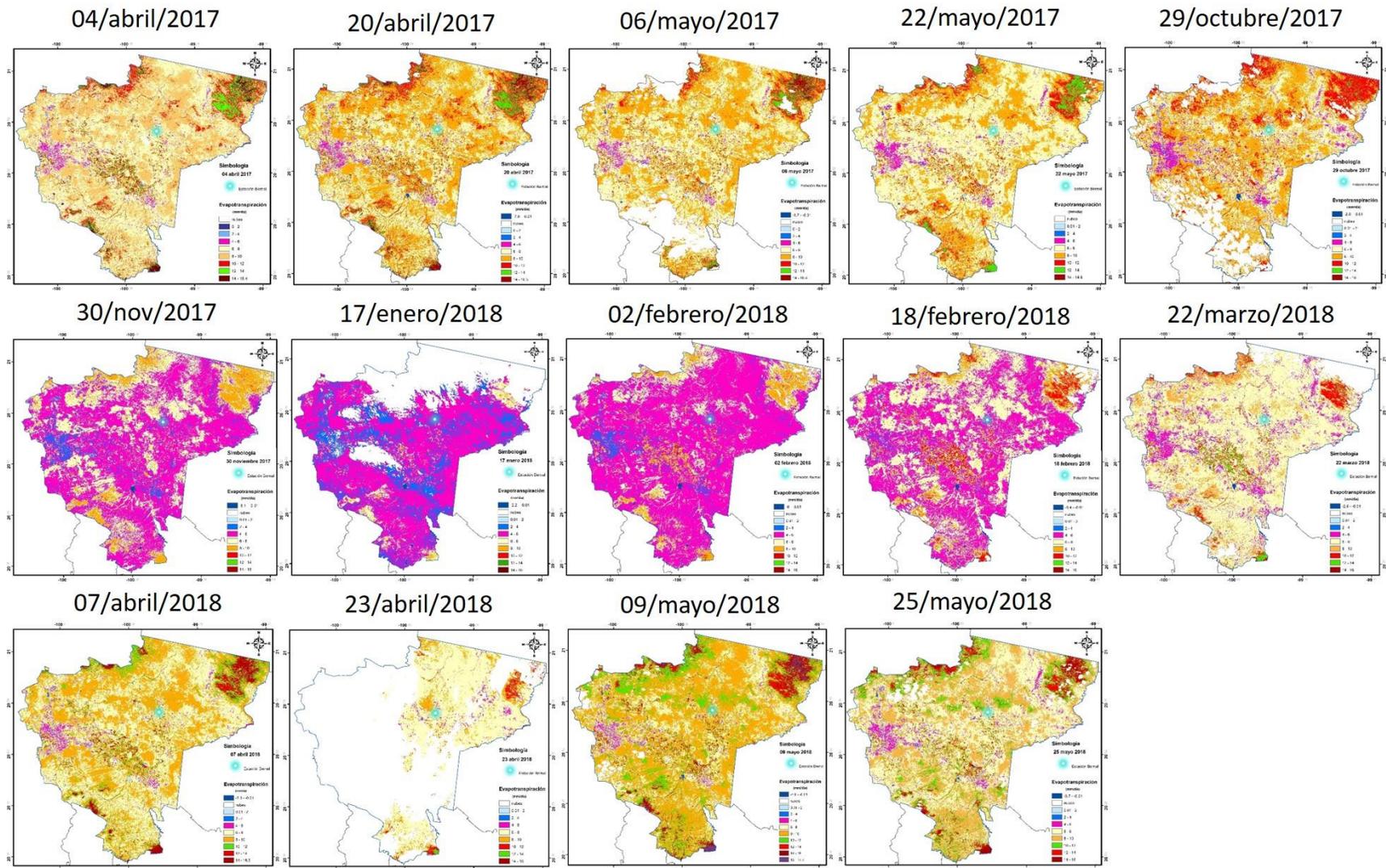


Figura 4.30 Mapas evapotranspiración por fecha de estimación

5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Luego del análisis de datos e interpretación de resultados, se ha llegado a la conclusión de que es factible utilizar información espacial y temporal de diferentes componentes para la estimación de la evapotranspiración, mediante la preparación de una base de datos meteorológica, teledetección y la implementación de un módulo hidroeomático, esto gracias a que:

1. Se integró una base de datos meteorológica y una base de datos satelital de imágenes Landsat 8 con 14 fechas correspondientes, para poder validar la metodología.
2. A partir de una exhaustiva revisión bibliográfica se logró integrar una metodología para estimar la evapotranspiración mediante imágenes de satélite Landsat 8. Esta metodología integró el cálculo de índices de vegetación, albedo, emisividad de superficie, emisividad atmosférica, longitud de onda corta entrante/saliente, longitud de onda larga entrante/saliente, temperatura de superficie y radiación neta.
3. Con la estimación de la Evapotranspiración diaria mediante esta metodología y contrastando los datos con los datos observados de ET en la estación Bernal se pudo validar la estimación de la ET encontrándose un ajuste $NSE = 0.82$ y un error aceptable 0.42 mm día^{-1} para matorral Xerófilo. Esto, demuestra la factibilidad de la obtención de resultados para la estimación de evapotranspiración en zonas semiáridas.
4. Una vez establecida y validada la metodología para la estimación de ET a partir de imágenes Landsat 8 se automatizó a partir del desarrolló de un módulo en Terrset, el cual se denominó **TMFREE** (**T**errSet **M**odule **F**o**R** **E**vapotranspiration **E**stimation through Landsat 8 images).
5. El módulo no solo permite obtener de forma automatizada la estimación de la evapotranspiración, también permite obtener el NDVI, el albedo de superficie, la temperatura de superficie y la radiación neta. Estas variables no sólo pueden ser utilizadas para la estimación de la Evapotranspiración, sino que también pueden ser utilizadas para estudios de distinta índole. Tal es el caso de la Temperatura de superficie del suelo, la cual se comprobó que sigue el comportamiento estacional y que puede ser utilizada para estudios de Isla de calor al igual que el albedo.

Finalmente, las principales recomendaciones son:

- Usar el módulo TMFREE para zonas mayormente planas ya que en zonas de montaña no tiene la sensibilidad de reconocer sombras, aumentando la incertidumbre del resultado
- Los datos meteorológicos son necesarios dentro de la implementación del módulo TMFREE, por lo que se recomienda trabajar con datos provenientes de estaciones automáticas con registros 30 minutarios o menores, que permita caracterizar a la hora de paso del satélite Landsat.
- Para posteriores investigaciones se recomienda disponer de una mayor cantidad de imágenes Landsat 8 en diferentes meses del mismo año con el propósito de investigar la variación estacional de la evapotranspiración.
- Completar el balance de energía: flujo de calor en el suelo (G), flujo de calor sensible (H), flujo de calor latente (Le), y validar para la zona de estudio.
- Integrar una base de datos de MexFlux con diferentes ecosistemas para poder realizar la validación y tener menor grado de incertidumbre.

6 BIBLIOGRAFÍA

- Aboukhaled, A., & Smith, M. (1986). Lysimeters (Vol. 39). Food & Agriculture Org.
- Águila, M. (2013). Agricultura en zonas áridas y semiáridas. *Idesia (Chile)*, 31(2), 3-4. <https://doi.org/10.4067/S0718-34292013000200001>
- Alanís-Rodríguez, E., Jiménez-Pérez, J., Mora-Olivo, A., Martínez-Ávalos, J. G., Mata-Balderas, J. M., & Chávez-Costa, C. (2015). Estructura y diversidad del matorral submontano contiguo al área metropolitana de Monterrey, Nuevo León, México. *Acta Botánica Mexicana*, 20.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (2006). Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. *Estudio FAO Riego y Drenaje*, 56.
- Allen, R, Pereira, L., Raes, D., & Smith, M. (2012). Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. Rome: FAO-Food and Agriculture Organization of the United Nations, 297 p., 1998.
- Crescentes de irrigação com água salina. *ACSA—Agropecuária Científica no Semiárido*, 8(4), 60-65.
- Allen, R, Tasumi, M., Trezza, R., Waters, R., & Bastiaanssen, W. (2002). SEBAL (surface energy balance algorithms for land). *Advance Training and Users Manual—Idaho Implementation*, version, 1, 97.
- Allen, RG, Pereira, L., Raes, D., & Smith, M. (2012). Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. Rome: FAO-Food and Agriculture Organization of the United Nations, 297 p., 1998.
- Crescentes de irrigação com água salina. *ACSA—Agropecuária Científica no Semiárido*, 8(4), 60-65.
- Allen, Richard, Tasumi, M., & Trezza, R. (2007). Satellite-Based Energy Balance for Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration (METRIC)—Model. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 133(4), 380-394. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2007\)133:4\(380\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2007)133:4(380))
- Amayreh, J. (1995). Lake evaporation: A model study.
- Ariza, A. (2013). Descripción y Corrección de Productos Landsat 8 LDCM (Landsat Data Continuity Mission). Bogotá: Instituto Geográfico Agustín Codazzi.
- Balbuena, J. D., Yépez, E. A., Pellat, F. P., Pérez, G. Á., Gutiérrez, C. A., Barrientos, M. S. A., Arredondo, T., Niño, F. A., Bullock, S. H., Castellanos, A. E., Cueva, A., Espinoza, B. F., Payán, J. G., Castillo, E. G. del, Sosa, E. G., Escobar, A. G., Hinojo, C. H., Tha, P. U. K., Celaya, C. L., ... Watts, C. J. (2019). Base de datos de flujos verticales de dióxido de carbono en ecosistemas terrestres y costeros en México. *Elementos para Políticas Públicas*, 2(2), 93-108.
- Bastiaanssen, W. G. M., Menenti, M., Feddes, R. A., & Holtslag, A. A. M. (1998). A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). 1. Formulation. *Journal of Hydrology*, 212-213, 198-212. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(98\)00253-4](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(98)00253-4)
- Blonquist Jr, J., Allen, R., & Bugbee, B. (2010). An evaluation of the net radiation sub-model in the ASCE standardized reference evapotranspiration equation: Implications for evapotranspiration prediction. *Agricultural water management*, 97(7), 1026-1038.
- Brown, P. (2014). Basics of evaporation and evapotranspiration.

- Burnett, B. (2007). A Procedure for Estimating Total Evapotranspiration Using Satellite-Based Vegetation Indices with Separate Estimates from Bare Soil. Master of science, University of Idaho.
- Campbell, J. B., & Wynne, R. H. (2011). Introduction to remote sensing. Guilford Press.
- Cano-Santana, Z., & Meave, J. (2009). Sucesión primaria en derrames volcánicos: El caso del Xitle. *Ciencias*, 0(041). <http://revistas.unam.mx/index.php/cns/article/view/11489>
- Cardoso, M. R. D., Marcuzzo, F. F. N., & Barros, J. R. (2015). Classificação climática de Köppen-Geiger para o estado de Goiás e o Distrito Federal. *Acta geográfica*, 8(16), 40-55.
- Castillo-Argüero, S., Montes-Cartas, G., Romero-Romero, M. A., Martínez-Orea, Y., Guadarrama-Chávez, P., Sánchez-Gallén, I., & Núñez-Castillo, O. (2004). Dinámica y conservación de la flora del matorral xerófilo de la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel (D.F., México). *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, 74. <http://www.redalyc.org/resumen.oa?id=57707404>
- Cerda, M. E. H., Anaya, G. C., & Sánchez, G. A. (2011). Degradación Del Suelo En Una Zona Semiárida Tropical De México. *Revista Geográfica de América Central*, 2, 1-14.
- Chander, G., Markham, B. L., & Helder, D. L. (2009). Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. *Remote sensing of environment*, 113(5), 893-903.
- Chow, V. T., Maidment, D. R., Mays, L. W., & Saldarriaga, J. G. (1994). *Hidrología aplicada* (Número 551.48 C4H5).
- Chuvieco, E. (1996). *Fundamentos de teledetección espacial* (Número 526.982 C564 1996). Ediciones Rialp.
- Chuvieco, E. (2002). *Teledetección ambiental. La observación de la Tierra desde el espacio*, 1.
- Chuvieco, E. (2010). *Teledetección ambiental: La observación de la tierra desde el espacio* (Ariel Ciencia). Madri: Huertas Industrias Gráficas.
- Cifuentes, C. P. (1971). *Evapotranspiración potencial en lisímetros y ecuaciones empíricas*. (Doctoral dissertation, Tesis para optar al título de Ingeniero Agrónomo. Escuela de Agronomía, Universidad de Concepción. Chillán).
- De Jong, S. M., Van der Meer, F. D., & Clevers, J. G. (2004). Basics of remote sensing. En *Remote Sensing Image Analysis: Including the Spatial Domain* (pp. 1-15). Springer.
- Di Leo, N. (2015). Drones: Nueva dimensión de la teledetección agroambiental y nuevo paradigma para la agricultura de precisión. *Agromensajes*, 7(41).
- Díaz, J. M. G. (2006). La fórmula de Penman-Monteith FAO 1998 para determinar la evapotranspiración de referencia, ETo. *Terra. Nueva Etapa*, XXII(31), 31-72.
- Díaz-Padilla, G., Sánchez-Cohen, I., Guajardo-Panes, R. A., Del Ángel-Pérez, A. L., Ruíz-Corral, A., Medina-García, G., & Ibarra-Castillo, D. (2011). Mapeo del índice de aridez y su distribución poblacional en México. *Revista Chapingo serie ciencias forestales y del ambiente*, 17(SPE), 267-275. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2010.09.069>
- Eastman, J. (2012). *IDRISI Selva manual*. Clark labs-Clark University. Worcester, Mass. USA.
- Elachi, C., & Van Zyl, J. J. (2006). *Introduction to the physics and techniques of remote sensing* (Vol. 28). John Wiley & Sons.

- FAO. (2006). Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Food & Agriculture Org.
- Gálvez, J. F. (2011). El recurso suelo-agua en medios áridos y semiáridos. 7.
- García, E. (2004). Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Garrison, J. D., & Adler, G. P. (1990). Estimation of precipitable water over the United States for application to the division of solar radiation into its direct and diffuse components. *Solar Energy*, 44(4), 225-241.
- Geethu Chandran, A., & Christy, J. (2015). A survey of cloud detection techniques for satellite images. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 2(9), 2485-2490.
- Glenn, E. P., Huete, A. R., Nagler, P. L., Hirschboeck, K. K., & Brown, P. (2007). Integrating remote sensing and ground methods to estimate evapotranspiration. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 26(3), 139-168.
- Gutiérrez, C., & Nieto, Á. L. (2006). Teledetección: Nociones y aplicaciones. carlos perez. https://books.google.com.mx/books?hl=es&lr=&id=SfrGxbO1DT0C&oi=fnd&pg=PA1&dq=teledeteccion+y+percepcion+remota&ots=pEkaTu3jF_&sig=d6wcNjeHp fXv0l1CyHGxncptVpU#v=onepage&q=teledeteccion%20y%20percepcion%20remota&f=false
- Hargreaves, G. H., & Samani, Z. A. (1985). Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied engineering in agriculture*, 1(2), 96-99.
- Hemakumara, H., Chandrapala, L., & Moene, A. F. (2003). Evapotranspiration fluxes over mixed vegetation areas measured from large aperture scintillometer. *Agricultural water management*, 58(2), 109-122.
- Holtz, U. (2003). La convención de las Naciones Unidas de lucha contra la desertificación (CNULD) y su dimensión política. 2003, 14.
- INEGI. (1999). Anuario estadístico del estado de Querétaro. INSTITUTO NACIONAL DE ESTADISTICA, 29.
- INEGI. (2014). Anuario estadístico y geográfico de Querétaro (p. 432).
- INEGI. (2017). Anuario estadístico y geográfico de Querétaro (p. 454).
- Jensen, M. E., Burman, R. D., & Allen, R. G. (1990). Evapotranspiration and irrigation water requirements.
- Jimenez-Muñoz, J. C., Sobrino, J. A., Skokovic, D., Mattar, C., & Cristobal, J. (2014). Land Surface Temperature Retrieval Methods From Landsat-8 Thermal Infrared Sensor Data. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 11(10), 1840-1843. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2014.2312032>
- Jin, M., Li, J., Wang, C., & Shang, R. (2015). A Practical Split-Window Algorithm for Retrieving Land Surface Temperature from Landsat-8 Data and a Case Study of an Urban Area in China. *Remote Sensing*, 7(4), 4371-4390. <https://doi.org/10.3390/rs70404371>
- Karlin, M. S. (2013). Cambio climático en zonas semiáridas. *Académica Española*. <https://rdu.unc.edu.ar/handle/11086/6664>
- Kincade, K. (2016). Optics of Google Earth. The international society for optics and photonics. <https://spie.org/news/spie-professional-magazine-archive/2016-october/optics-of-google-earth>
- Linsley, R. K., Kohler, M. A., & Paulhus, J. L. (1977). Hidrología para ingenieros.

- Llamas, J. M. (1993). *Hidrología general: Principios y aplicaciones*/José Llamas. Univ. País Vasco.
- MANRIQUEZ, J. L. (2018). Desarrollo de un algoritmo para fusionar imágenes en sensor remoto [Universidad Autónoma del Estado de México]. <http://ri.uaemex.mx/handle/20.500.11799/95503>
- McKenney, M. S., & Rosenberg, N. J. (1993). Sensitivity of some potential evapotranspiration estimation methods to climate change. *Agricultural and Forest Meteorology*, 64(1-2), 81-110.
- Medrano, F. G. (2012). Las zonas áridas y semiáridas de México y su vegetación. Instituto Nacional de Ecología.
- Monsalve, G. (1999). *Hidrología en la Ingeniería*. Alfaomega, Colombia.
- Morales-Romero, D., & Molina-Freaner, F. (2016). Conversion of thornscrub to buffelgrass pasture in northwestern Mexico: Microclimatic consequences. *Journal of Arid Environments*, 125, 110-115.
- Muñoz Iniestra, D. J., Chávez Mosqueda, M., Godínez Álvarez, H. O., & Cuéllar Arellano, N. A. (2017). Cambios edáficos en islas de fertilidad y su importancia en el funcionamiento de un ecosistema del valle de Tehuacán Puebla, México. *Terra Latinoamericana*, 35(2), 123-133.
- NASA. (2020). Sobre Landsat Science. Landsat then and now. <https://landsat.gsfc.nasa.gov/about/>
- Ordóñez, E., Chávez, L., Nolasco, A., Crespo, G., & Haro, G. (2001). Evapotranspiración y balance de energía en el cultivo de alfalfa. *Agrociencia*, 35(1). <http://www.redalyc.org/resumen.oa?id=30235102>
- Pohl, C., & Van Genderen, J. (2017). *Remote sensing image fusion: A practical guide*. Crc Press.
- Ramírez-Juidías, E., Pozo-Morales, L., & Galán-Ortiz, L. (2013). Procedimiento para la Obtención de una Imagen Teledetectada a Partir de Fotografía.
- Rivera-Navincopa, J. L. (2018). Implementación de un modelo físico de balance de energía para la determinación de la evapotranspiración mensual en zonas altoandinas-Huancavelica mediante teledetección. Nacional Mayor de San Marcos.
- Rzedowski, J. (1981). *The vegetation of Mexico*. (Limusa). Editorial Limusa.
- Rzedowski, J. (1991). El endemismo en la flora fanerogámica mexicana: Una apreciación analítica preliminar. *Acta Botánica Mexicana*, 15, 47-64.
- Salas, J. D. (2000). Hidrología de zonas áridas y semiáridas. *Ingeniería del agua*, 7(4), 409-429. <https://doi.org/10.4995/ia.2000.2855>
- San Román, F. J. S. (2004). Dpto. Geología—Univ. Salamanca (España).
- Sánchez, J. M., Caselles, V., Niclòs, R., Valor, E., & Coll, C. (2005). Cálculo de la evapotranspiración real diaria en la zona norte de Finlandia empleando técnicas de teledetección. *GeoFocus. Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, 0(5), 278-300.
- Sánchez, M. (2001). Métodos de estimación de evapotranspiración utilizados en Chile. *Revista de Geografía Norte Grande*, 28, 3-10.
- Sanjurjo Vílchez, J., & Kalliola, R. (2004). Manual para la elaboración de mosaicos de imágenes de satélite Landsat TM para la selva baja peruana.
- Schirmbeck, J., Cybis, D., Roberti, D. R., & Wolfarth, L. W. (2018). Energy balance from images in humid climate – SEBAL and METRIC. *Agrometeoros*, 25(2), 11 (383-393). <https://doi.org/10.31062/agrom.v25i2.25766>

- Silva, B. B. da, Braga, A. C., Braga, C. C., Oliveira, L. M. M. de, Montenegro, S. M. G. L., Barbosa Junior, B., Silva, B. B. da, Braga, A. C., Braga, C. C., Oliveira, L. M. M. de, Montenegro, S. M. G. L., & Barbosa Junior, B. (2016). Procedures for calculation of the albedo with OLI-Landsat 8 images: Application to the Brazilian semi-arid. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 20(1), 3-8. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v20n1p3-8>
- Trezza, R. (2002). Evapotranspiration using a satellite-based surface energy balance with standardized ground control.
- Turner, R. E., & Spencer, M. M. (1973). Atmospheric model for correction of spacecraft data. II, 895-934.
- USGS. (2016). Misiones Landsat [Open-File Report]. Science for a Changing World. https://www.usgs.gov/land-resources/nli/landsat/landsat-8?qt-science_support_page_related_con=0#qt-science_support_page_related_con
- USGS. (2018). Misiones de satélite Landsat [Fact Sheet]. Science for a Changing World. https://www.usgs.gov/land-resources/nli/landsat/landsat-satellite-missions?qt-science_support_page_related_con=2#qt-science_support_page_related_con
- Vallejos, S., & José, J. (1972). Fórmula para estimar la transpiración potencial de los cultivos.
- Vargas, R., Yépez, E., Andrade, J. L., Ángeles, G., Arredondo, T., Castellanos, A., Delgado, J., Garatuza-Payan, J., Castillo, E. G. del, Oechel, W., Sánchez-Azofeifa, A., Velasco, E., Vivoni, E., & Watts, C. (2013). PROGRESS AND OPPORTUNITIES FOR MONITORING GREENHOUSE GASES FLUXES IN MEXICAN ECOSYSTEMS: THE MEXFLUX NETWORK. *Atmósfera*, 26(3). <https://www.revistascca.unam.mx/atm/index.php/atm/article/view/30690>
- Vaughan, P., Trout, T., & Ayars, J. E. (2007). A processing method for weighing lysimeter data and comparison to micrometeorological ETo predictions. *Agricultural water management*, 88(1-3), 141-146.
- Walter, I. A., Allen, R. G., Elliott, R., Jensen, M., Itenfisu, D., Mecham, B., Howell, T., Snyder, R., Brown, P., & Echings, S. (2000). ASCE's standardized reference evapotranspiration equation. En *Watershed management and operations management 2000* (pp. 1-11).
- Wang, F., Qin, Z., Song, C., Tu, L., Karnieli, A., & Zhao, S. (2015). An improved mono-window algorithm for land surface temperature retrieval from Landsat 8 thermal infrared sensor data. *Remote Sensing*, 7(4), 4268-4289.
- Wang, K., Wang, P., Li, Z., Cribb, M., & Sparrow, M. (2007). A simple method to estimate actual evapotranspiration from a combination of net radiation, vegetation index, and temperature. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 112(D15). <https://doi.org/10.1029/2006JD008351>
- Waseem, M., Mani, N., Andiego, G., & Usman, M. (2017). A review of criteria of fit for hydrological models. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 4(11), 1765-1772.
- Whitford, W. G. (1986). *Pattern and process in desert ecosystems*. University of New Mexico Press.
- Wiegand, K., Jeltsch, F., & Ward, D. (1999). Analysis of the population dynamics of Acacia trees in the Negev desert, Israel with a spatially-explicit computer simulation model. *Ecological Modelling*, 117(2-3), 203-224.
- Zanter, K. (2016). *Landsat 8 (L8) data users handbook*. Landsat Science Official Website.

7 ANEXOS

7.1 Tablas comparativas para validación

7.1.1 Temperatura de superficie (Ts) °C para el año 2017

Tabla 7.1 Validación 04-abril-2017, (Ts) °C

Fecha	Pixel	Ts °C estimada	Ts °C observada
04-abr-17	1	40.72	21.71
04-abr-17	2	40.68	21.71
04-abr-17	3	40.61	21.71
04-abr-17	4	40.72	21.71
04-abr-17	5	40.77	21.71
04-abr-17	6	40.71	21.71
04-abr-17	7	39.23	21.71
04-abr-17	8	39.28	21.71
04-abr-17	9	40.38	21.71

Tabla 7.2 Validación 20-abril-2017, (Ts) °C

Fecha	Pixel	Ts °C estimada	Ts °C observada
20-abr-17	1	44.83	19.07
20-abr-17	2	45.07	19.07
20-abr-17	3	43.99	19.07
20-abr-17	4	43.13	19.07
20-abr-17	5	43.47	19.07
20-abr-17	6	43.15	19.07
20-abr-17	7	44.36	19.07
20-abr-17	8	43.36	19.07
20-abr-17	9	43.88	19.07

Tabla 7.3 Validación 06-mayo-2017, (Ts) °C

Fecha	Pixel	Ts °C estimada	Ts °C observada
06-may-17	1	50.32	28.88
06-may-17	2	50.25	28.88
06-may-17	3	48.71	28.88
06-may-17	4	50.20	28.88
06-may-17	5	50.18	28.88
06-may-17	6	48.73	28.88

06-may-17	7	48.64	28.88
06-may-17	8	48.74	28.88
06-may-17	9	48.76	28.88

Tabla 7.4 Validación 22-mayo-2017, (Ts) °C

Fecha	Pixel	Ts °C estimada	Ts °C observada
22-may-17	1	49.09	29.91
22-may-17	2	40.26	29.91
22-may-17	3	49.29	29.91
22-may-17	4	48.99	29.91
22-may-17	5	49.16	29.91
22-may-17	6	47.83	29.91
22-may-17	7	48.81	29.91
22-may-17	8	49.03	29.91
22-may-17	9	47.72	29.91

Tabla 7.5 Validación 29-octubre-2017, (Ts) °C

Fecha	Pixel	Ts °C estimada	Ts °C observada
29-oct-17	1	32.44	21.25
29-oct-17	2	33.34	21.25
29-oct-17	3	32.82	21.25
29-oct-17	4	32.31	21.25
29-oct-17	5	32.69	21.25
29-oct-17	6	32.84	21.25
29-oct-17	7	32.21	21.25
29-oct-17	8	32.66	21.25
29-oct-17	9	32.86	21.25

Tabla 7.6 Validación 30-noviembre-2017, (Ts) °C

Fecha	Pixel	Ts °C estimada	Ts °C observada
30-nov-17	1	28.55	16.29
30-nov-17	2	28.75	16.29
30-nov-17	3	28.98	16.29
30-nov-17	4	28.40	16.29
30-nov-17	5	28.74	16.29
30-nov-17	6	29.03	16.29
30-nov-17	7	28.27	16.29
30-nov-17	8	28.73	16.29
30-nov-17	9	29.00	16.29

7.1.2 Radiación neta (Rn) $W m^{-2}$ para el año 2017

Tabla 7.7 Validación 22-mayo-2017, (Rn) $W m^{-2}$

Fecha	Pixel	Rn estimada	Rn observada
22-may-17	1	490.24	460.61
22-may-17	2	488.43	460.61
22-may-17	3	496.54	460.61
22-may-17	4	498.67	460.61
22-may-17	5	488.37	460.61
22-may-17	6	509.13	460.61
22-may-17	7	505.46	460.61
22-may-17	8	497.31	460.61
22-may-17	9	504.67	460.61

Tabla 7.8 Validación 29-octubre-2017, (Rn) $W m^{-2}$

Fecha	Pixel	Rn estimada	Rn observada
29-oct-17	1	503.48	519.18
29-oct-17	2	497.25	519.18
29-oct-17	3	514.52	519.18
29-oct-17	4	511.03	519.18
29-oct-17	5	502.95	519.18
29-oct-17	6	512.51	519.18
29-oct-17	7	519.28	519.18
29-oct-17	8	512.78	519.18
29-oct-17	9	509.57	519.18

Tabla 7.9 Validación 30-noviembre-2017, (Rn) $W m^{-2}$

Fecha	Pixel	Rn estimada	Rn observada
30-nov-17	1	409.45	459.91
30-nov-17	2	407.81	459.91
30-nov-17	3	418.37	459.91
30-nov-17	4	417.39	459.91
30-nov-17	5	409.13	459.91
30-nov-17	6	419.67	459.91
30-nov-17	7	421.14	459.91
30-nov-17	8	415.37	459.91
30-nov-17	9	414.35	459.91

7.1.3 Evapotranspiración (ET) para el año 2017

Tabla 7.10 Validación 22-mayo-2017, (ET) mm día⁻¹

Fecha	Pixel	ET estimada	ET observada
22-may-17	1	6.82	6.81
22-may-17	2	6.85	6.81
22-may-17	3	7.07	6.81
22-may-17	4	7.01	6.81
22-may-17	5	6.91	6.81
22-may-17	6	7.38	6.81
22-may-17	7	7.09	6.81
22-may-17	8	7.07	6.81
22-may-17	9	7.29	6.81

Tabla 7.11 Validación 29-octubre-2017, (ET) mm día⁻¹

Fecha	Pixel	ET estimada	ET observada
29-oct-17	1	6.23	7.27
29-oct-17	2	6.22	7.27
29-oct-17	3	6.62	7.27
29-oct-17	4	6.27	7.27
29-oct-17	5	6.27	7.27
29-oct-17	6	6.50	7.27
29-oct-17	7	6.53	7.27
29-oct-17	8	6.68	7.27
29-oct-17	9	6.58	7.27

Tabla 7.12 Validación 30-noviembre-2017, (ET) mm día⁻¹

Fecha	Pixel	ET estimada	ET observada
30-nov-17	1	5.48	5.09
30-nov-17	2	5.47	5.09
30-nov-17	3	5.86	5.09
30-nov-17	4	5.54	5.09
30-nov-17	5	5.53	5.09
30-nov-17	6	5.89	5.09
30-nov-17	7	5.69	5.09
30-nov-17	8	5.73	5.09
30-nov-17	9	5.77	5.09

7.1.4 Temperatura de superficie (Ts) °C para el año 2018

Tabla 7.13 Validación 17-enero-2018, (Ts) °C

Fecha	Pixel	Ts °C estimada	Ts °C observada
17-ene-18	1	24.62	13.98
17-ene-18	2	23.45	13.98
17-ene-18	3	23.65	13.98
17-ene-18	4	23.32	13.98
17-ene-18	5	23.50	13.98
17-ene-18	6	23.66	13.98
17-ene-18	7	23.36	13.98
17-ene-18	8	23.54	13.98
17-ene-18	9	23.67	13.98

Tabla 7.14 Validación 02-febrero-2018, (Ts) °C

Fecha	Pixel	Ts °C estimada	Ts °C observada
02-feb-18	1	30.74	16.74
02-feb-18	2	30.83	16.74
02-feb-18	3	31.04	16.74
02-feb-18	4	30.73	16.74
02-feb-18	5	30.86	16.74
02-feb-18	6	31.08	16.74
02-feb-18	7	30.75	16.74
02-feb-18	8	30.89	16.74
02-feb-18	9	31.05	16.74

Tabla 7.15 Validación 18-febrero-2018, (Ts) °C

Fecha	Pixel	Ts °C estimada	Ts °C observada
18-feb-18	1	36.04	19.70
18-feb-18	2	36.30	19.70
18-feb-18	3	35.21	19.70
18-feb-18	4	35.86	19.70
18-feb-18	5	36.16	19.70
18-feb-18	6	35.10	19.70
18-feb-18	7	35.69	19.70
18-feb-18	8	34.70	19.70
18-feb-18	9	35.09	19.70

Tabla 7.16 Validación 22-marzo-2018, (Ts) °C

Fecha	Pixel	Ts °C estimada	Ts °C observada
22-mar-18	1	41.77	24.35
22-mar-18	2	41.90	24.35
22-mar-18	3	42.16	24.35
22-mar-18	4	41.69	24.35
22-mar-18	5	41.88	24.35
22-mar-18	6	40.70	24.35
22-mar-18	7	41.57	24.35
22-mar-18	8	40.40	24.35
22-mar-18	9	40.63	24.35

Tabla 7.17 Validación 23-abril-2018, (Ts) °C

Fecha	Pixel	Ts °C estimada	Ts °C observada
23-abr-18	1	41.59	24.74
23-abr-18	2	41.68	24.74
23-abr-18	3	41.73	24.74
23-abr-18	4	41.47	24.74
23-abr-18	5	41.58	24.74
23-abr-18	6	40.29	24.74
23-abr-18	7	41.42	24.74
23-abr-18	8	41.53	24.74
23-abr-18	9	40.31	24.74

Tabla 7.18 Validación 09-mayo-2018, (Ts) °C

Fecha	Pixel	Ts °C estimada	Ts °C observada
09-may-18	1	42.87	22.51
09-may-18	2	43.06	22.51
09-may-18	3	43.18	22.51
09-may-18	4	42.81	22.51
09-may-18	5	43.05	22.51
09-may-18	6	43.21	22.51
09-may-18	7	42.74	22.51
09-may-18	8	42.94	22.51
09-may-18	9	43.17	22.51

Tabla 7.19 Validación 25-mayo-2018, (Ts) °C

Fecha	Pixel	Ts °C estimada	Ts °C observada
25-may-18	1	46.88	29.75
25-may-18	2	47.15	29.75
25-may-18	3	47.41	29.75
25-may-18	4	46.73	29.75
25-may-18	5	47.01	29.75
25-may-18	6	47.27	29.75
25-may-18	7	46.88	29.75
25-may-18	8	46.93	29.75
25-may-18	9	47.19	29.75

7.1.5 Radiación neta (Rn) W m⁻², para el año 2018

Tabla 7.20 Validación 17-enero-2018, (Rn) W m⁻²

Fecha	Pixel	Rn estimada	Rn observada
17-ene-18	1	383.76	408.59
17-ene-18	2	392.32	408.59
17-ene-18	3	400.32	408.59
17-ene-18	4	400.65	408.59
17-ene-18	5	394.05	408.59
17-ene-18	6	391.28	408.59
17-ene-18	7	402.46	408.59
17-ene-18	8	397.56	408.59
17-ene-18	9	388.77	408.59

Tabla 7.21 Validación 02-febrero-2018, (Rn) W m⁻²

Fecha	Pixel	Rn estimada	Rn observada
02-feb-18	1	420.49	416.3
02-feb-18	2	419.42	416.3
02-feb-18	3	432.38	416.3
02-feb-18	4	429.11	416.3
02-feb-18	5	421.39	416.3
02-feb-18	6	423.88	416.3
02-feb-18	7	432.74	416.3
02-feb-18	8	428.72	416.3
02-feb-18	9	415.51	416.3

Tabla 7.22 Validación 18-febrero-2018, (Rn) W m⁻²

Fecha	Pixel	Rn estimada	Rn observada
18-feb-18	1	462.10	467.69
18-feb-18	2	459.49	467.69
18-feb-18	3	479.95	467.69
18-feb-18	4	469.46	467.69
18-feb-18	5	461.94	467.69
18-feb-18	6	475.25	467.69
18-feb-18	7	474.86	467.69
18-feb-18	8	479.34	467.69
18-feb-18	9	468.55	467.69

Tabla 7.23 Validación 22-marzo-2018, (Rn) W m⁻²

Fecha	Pixel	Rn estimada	Rn observada
22-mar-18	1	502.43	511.38
22-mar-18	2	504.87	511.38
22-mar-18	3	514.39	511.38
22-mar-18	4	515.37	511.38
22-mar-18	5	505.70	511.38
22-mar-18	6	516.46	511.38
22-mar-18	7	521.10	511.38
22-mar-18	8	522.38	511.38
22-mar-18	9	512.31	511.38

Tabla 7.24 Validación 07-abril-2018, (Rn) W m⁻²

Fecha	Pixel	Rn estimada	Rn observada
07-abr-18	1	537.18	414.82
07-abr-18	2	537.85	414.82
07-abr-18	3	568.13	414.82
07-abr-18	4	543.99	414.82
07-abr-18	5	568.20	414.82
07-abr-18	6	556.69	414.82
07-abr-18	7	564.82	414.82
07-abr-18	8	559.76	414.82
07-abr-18	9	548.65	414.82

Tabla 7.25 Validación 23-abril-2018, (Rn) W m⁻²

Fecha	Pixel	Rn estimada	Rn observada
23-abr-18	1	526.18	534.28
23-abr-18	2	525.46	534.28
23-abr-18	3	535.45	534.28
23-abr-18	4	534.96	534.28
23-abr-18	5	552.28	534.28
23-abr-18	6	537.21	534.28
23-abr-18	7	542.35	534.28
23-abr-18	8	532.77	534.28
23-abr-18	9	530.30	534.28

Tabla 7.26 Validación 09-mayo-2018, (Rn) W m⁻²

Fecha	Pixel	Rn estimada	Rn observada
09-may-18	1	610.17	610.20
09-may-18	2	613.88	610.20
09-may-18	3	626.88	610.20
09-may-18	4	622.76	610.20
09-may-18	5	616.11	610.20
09-may-18	6	621.32	610.20
09-may-18	7	634.88	610.20
09-may-18	8	626.67	610.20
09-may-18	9	618.70	610.20

Tabla 7.27 Validación 25-mayo-2018, (Rn) W m⁻²

Fecha	Pixel	Rn estimada	Rn observada
25-may-18	1	573.87	561.59
25-may-18	2	573.29	561.59
25-may-18	3	586.73	561.59
25-may-18	4	589.30	561.59
25-may-18	5	575.48	561.59
25-may-18	6	579.81	561.59
25-may-18	7	551.43	561.59
25-may-18	8	544.35	561.59
25-may-18	9	530.11	561.59

7.1.6 Evapotranspiración (ET) para el año 2018

Tabla 7.28 Validación 17-enero-2018, (ET) mm día⁻¹

Fecha	Pixel	ET estimada	ET observada
17-ene-18	1	4.40	4.24
17-ene-18	2	4.48	4.24
17-ene-18	3	4.70	4.24
17-ene-18	4	4.65	4.24
17-ene-18	5	4.61	4.24
17-ene-18	6	4.58	4.24
17-ene-18	7	4.55	4.24
17-ene-18	8	4.67	4.24
17-ene-18	9	4.56	4.24

Tabla 7.29 Validación 02-febrero-2018, (ET) mm día⁻¹

Fecha	Pixel	ET estimada	ET observada
02-feb-18	1	5.20	4.94
02-feb-18	2	5.21	4.94
02-feb-18	3	5.52	4.94
02-feb-18	4	5.50	4.94
02-feb-18	5	5.37	4.94
02-feb-18	6	5.52	4.94
02-feb-18	7	5.34	4.94
02-feb-18	8	5.44	4.94
02-feb-18	9	5.24	4.94

Tabla 7.30 Validación 18-febrero-2018, (ET) mm día⁻¹

Fecha	Pixel	ET estimada	ET observada
18-feb-18	1	5.53	5.53
18-feb-18	2	5.50	5.53
18-feb-18	3	5.94	5.53
18-feb-18	4	5.62	5.53
18-feb-18	5	5.59	5.53
18-feb-18	6	5.84	5.53
18-feb-18	7	5.73	5.53
18-feb-18	8	5.79	5.53
18-feb-18	9	5.73	5.53

Tabla 7.31 Validación 22-marzo-2018, (ET) mm día⁻¹

Fecha	Pixel	ET estimada	ET observada
22-mar-18	1	6.14	6.49
22-mar-18	2	6.27	6.49
22-mar-18	3	6.53	6.49
22-mar-18	4	6.52	6.49
22-mar-18	5	6.37	6.49
22-mar-18	6	6.59	6.49
22-mar-18	7	6.37	6.49
22-mar-18	8	6.61	6.49
22-mar-18	9	6.67	6.49

Tabla 7.32 Validación 07-abril-2018, (ET) mm día⁻¹

Fecha	Pixel	ET estimada	ET observada
07-abr-18	1	7.05	7.44
07-abr-18	2	7.07	7.44
07-abr-18	3	7.73	7.44
07-abr-18	4	7.14	7.44
07-abr-18	5	7.26	7.44
07-abr-18	6	7.49	7.44
07-abr-18	7	7.65	7.44
07-abr-18	8	7.66	7.44
07-abr-18	9	7.52	7.44

Tabla 7.33 Validación 23-abril-2018, (ET) mm día⁻¹

Fecha	Pixel	ET estimada	ET observada
23-abr-18	1	6.59	7.02
23-abr-18	2	6.64	7.02
23-abr-18	3	6.91	7.02
23-abr-18	4	6.87	7.02
23-abr-18	5	6.77	7.02
23-abr-18	6	6.93	7.02
23-abr-18	7	6.85	7.02
23-abr-18	8	6.85	7.02
23-abr-18	9	6.83	7.02

Tabla 7.34 Validación 09-mayo-2018, (ET) mm día⁻¹

Fecha	Pixel	ET estimada	ET observada
09-may-18	1	7.58	8.28
09-may-18	2	7.80	8.28
09-may-18	3	8.16	8.28
09-may-18	4	7.80	8.28
09-may-18	5	7.90	8.28
09-may-18	6	8.21	8.28
09-may-18	7	8.36	8.28
09-may-18	8	8.31	8.28
09-may-18	9	8.42	8.28

Tabla 7.35 Validación 25-mayo-2018, (ET) mm día⁻¹

Fecha	Pixel	ET estimada	ET observada
25-may-18	1	7.36	8.08
25-may-18	2	7.45	8.08
25-may-18	3	7.96	8.08
25-may-18	4	7.76	8.08
25-may-18	5	7.62	8.08
25-may-18	6	7.93	8.08
25-may-18	7	7.62	8.08
25-may-18	8	7.80	8.08
25-may-18	9	7.59	8.08

7.2 Manual de usuario TMFREE

Bases teóricas del módulo

Módulo

Un módulo se puede definir, como el lugar donde se almacena el código fuente de una aplicación, los módulos se almacenan en un archivo con extensión **.exe** y son la base de las aplicaciones de TerrSet. Pueden contener procedimientos que controlen declaraciones a nivel de formulario de variables, constantes y procedimientos externos.

Formulario

Es un contenedor donde se colocan todos los controles que componen una aplicación. El diseñador de formulario le permite definir el aspecto de su formulario en tiempo de diseño colocando controles en su superficie y definiendo sus propiedades.

Cuando se ejecuta la aplicación, el ejecutable convierte estas piezas de información en un conjunto de funciones que crearán la ventana principal.

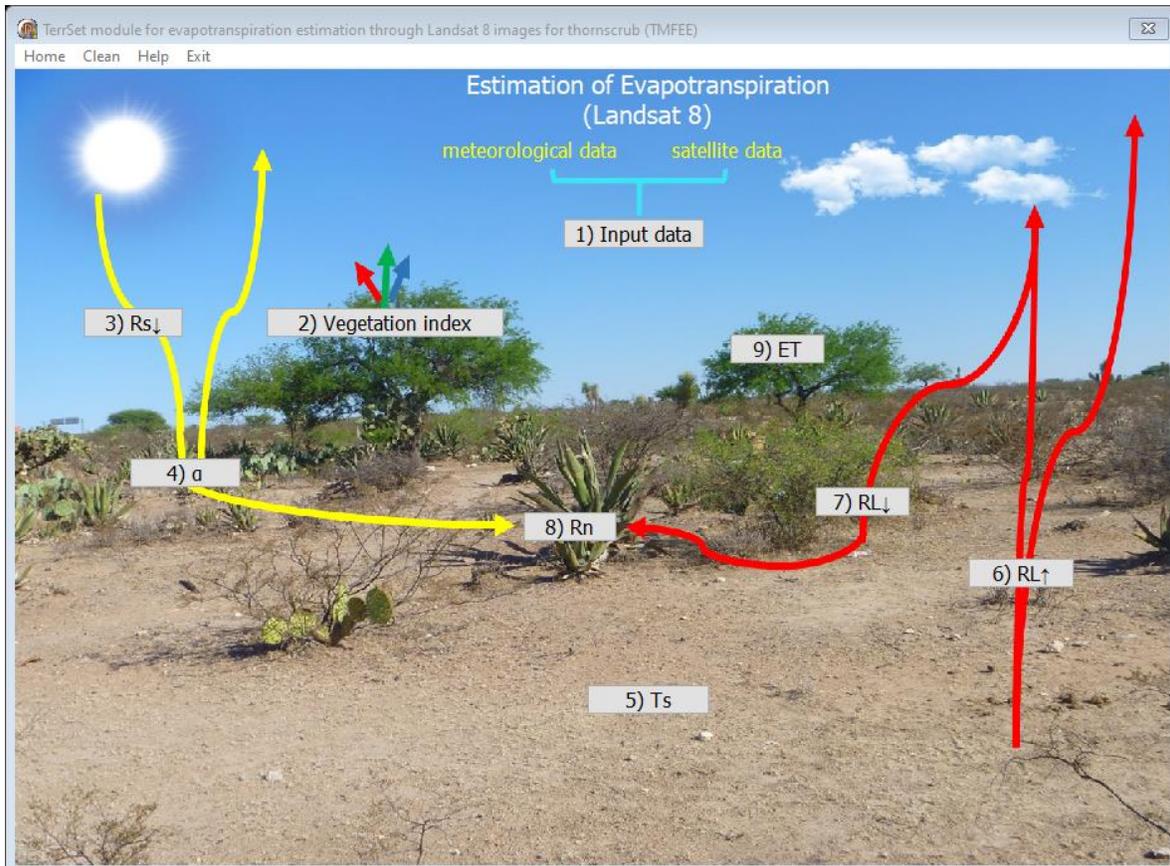


Figura 7.1 Esquema de interfaz

Barra de menú

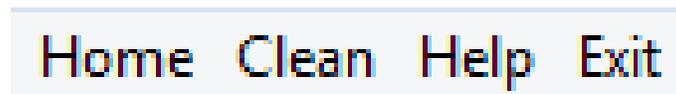


Figura 7.2 Barra de menú

Al conjunto de opciones presentadas al usuario para su selección en una zona determinada de la pantalla se les llama menús. La gran mayoría de las aplicaciones poseen menús que contienen todas las herramientas necesarias que hacen posible la utilidad de la aplicación.

Los botones de comando son aquellos botones típicos que vemos frecuentemente en los módulos de TerrSet, que realizan una operación en específico, por ejemplo, salir, imprimir, cancelar, etc. Los botones de comando se utilizan principalmente para iniciar, interrumpir o terminar un proceso.

7.2.1 Requerimientos

Requerimientos del sistema TerrSet

TerrSet es un sistema orientado a objetos diseñado para uso de nivel profesional en plataformas que emplean el entorno operativo Microsoft Windows.

- Windows 7 o superior
- Microsoft Office 2010 o posterior
- 1.3 GB de espacio en el disco duro para la aplicación
- 7.4 GB de espacio en el disco duro para los datos del tutorial
- 4 GB de RAM, se recomiendan 8 GB o más
- Pantalla HD (1920 x 1080) o superior recomendada

Debemos entender que TerrSet es software privativo, pero se puede obtener la versión de prueba por 30 días; en el siguiente link <https://clarklabs.org/quote/> solicitamos información llenando un formulario.

Requerimientos del módulo TMFREE

- Imágenes Landsat 8 con extensión .rst
- Metadatos con extensión .txt
- Altitud (msnm) de la estación climatológica
- Coordenadas geográficas de la estación climatológica
- Registros climatológicos (temperatura ambiente, humedad relativa, velocidad del viento) mínimo cada 30 minutos

Funcionamiento del módulo TMFREE

Ventana del módulo TMFREE

Cuando se abre el módulo TMFREE, la ventana ocupa el centro del escritorio. Aunque no sea requerido, se recomienda mantenerlo de esta manera porque muchas de las ventanas de diálogo e imágenes que TerrSet visualiza necesitan una cantidad de espacio sustancial para el correcto desempeño del módulo.

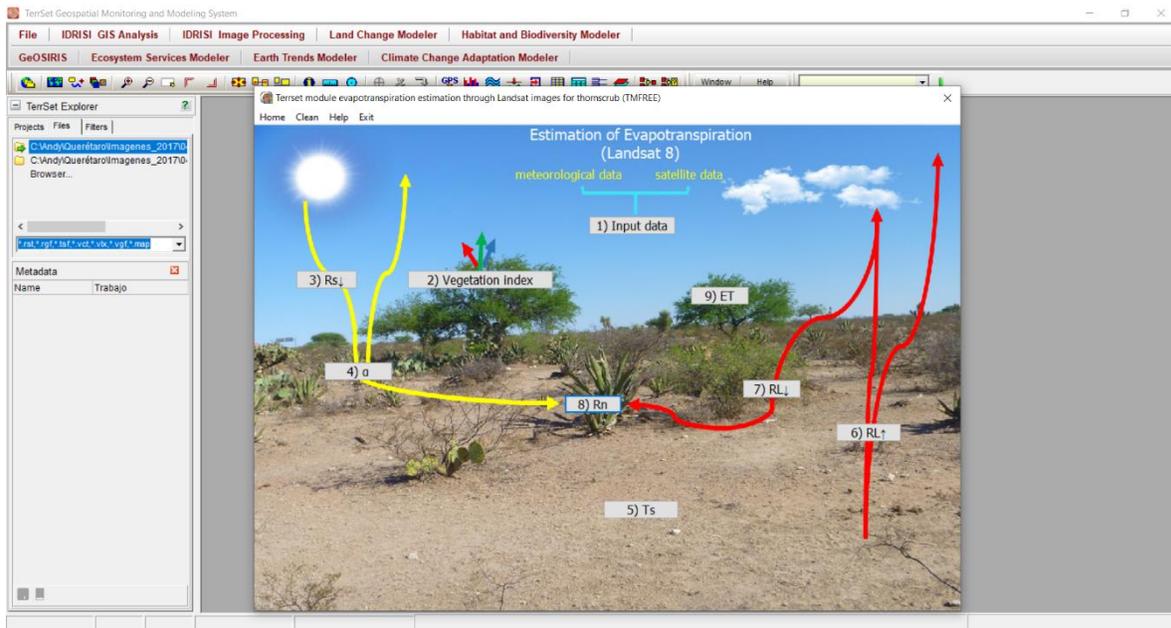


Figura 7.3 Interfaz del módulo TMFREE

Sistema menú

El sistema menú se encuentra en la parte superior de la ventana del módulo, puede activarlo con el mouse. Al clicar sobre una opción del menú, aparecerá un submenú o en su defecto realizará la acción que el menú indica.

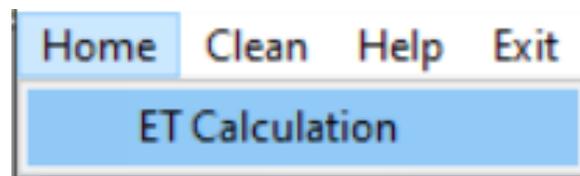


Figura 7.4 Menú del módulo TMFREE

La barra de menú resulta muy similar a la de cualquier aplicación convencional, tal y como se puede apreciar en la **Tabla 7.36** se describe cada menú por separado.

Tabla 7.36 Funciones de la barra de menú

Propiedad	Descripción
<i>Home</i>	La selección de este menú hace que retorne a la interfaz principal del módulo
<i>Clean</i>	La selección de este menú permite borrar datos del formulario por completo en caso de que el usuario desee rehacerlo desde el principio.
<i>Help</i>	Se basa fundamentalmente en una clasificación temática ordenada de la información disponible, en una clasificación alfabética de la información y en la búsqueda de información sobre algún tema por nombre.
<i>Exit</i>	La selección de este menú hace que se cierre la aplicación.

Barra de herramientas

El software TerrSet tiene un juego de botones que se llama barra de herramientas (*Figura 7.5*). Cada botón representa un módulo del programa o bien una operación interactiva que se puede seleccionar cliqueando sobre el botón con el mouse.

Algunos de estos botones pueden quedar en estado activo o inactivo. Cuando están activos, los botones aparecen como presionados luego de ser cliqueados. En estos casos, se desactivan al cliquear de nuevo sobre los mismos.

También podrá observar que algunos botones no están disponibles para ser usados. Esto se indica con el icono del botón en color gris. Apoye el cursor sobre un icono para que el nombre de la función o del módulo representado por el icono aparezca momentáneamente. El juego de iconos representa funciones de visualización interactiva, como también algunos de los módulos más usados.



Figura 7.5 Barra de herramientas TerrSet

7.2.2 Interfaz del programa

A los submódulos del programa se puede acceder de tres formas:

- I. Seleccionando el módulo en la estructura del menú y activándolo con un clic del mouse
- II. Seleccionando su icono de programa en la barra de herramientas, justo debajo del menú
- III. Seleccionando el nombre del módulo de la lista alfabética que ofrece acceso directo

Cada uno de estos métodos activa una ventana de diálogo para ese módulo. Luego de ingresar la información necesaria para la operación a realizarse y de clicar el botón OK (process), empezará a funcionar el módulo del programa.

Lista de selección

La ventana principal cuenta con 9 botones numerados para la estimación de Evapotranspiración (ET):

- Entrada de datos
- Índices de vegetación
- Radiación de onda corta entrante
- Albedo de superficie

1) Input data

2) Vegetation index

3) $R_{s\downarrow}$

4) α

- Temperatura de superficie 5) Ts
- Radiación de onda larga saliente 6) RL↑
- Radiación de onda larga entrante 7) RL↓
- Radiación neta 8) Rn
- Evapotranspiración 9) ET

1) Entrada de datos

Al seleccionar el primer botón *1) Input data* en la ventana principal aparecen dos elementos, un botón que busca la ruta del archivo metadatos de las imágenes Landsat 8 y una casilla texto que ayuda a reconocer la ruta del archivo seleccionado.

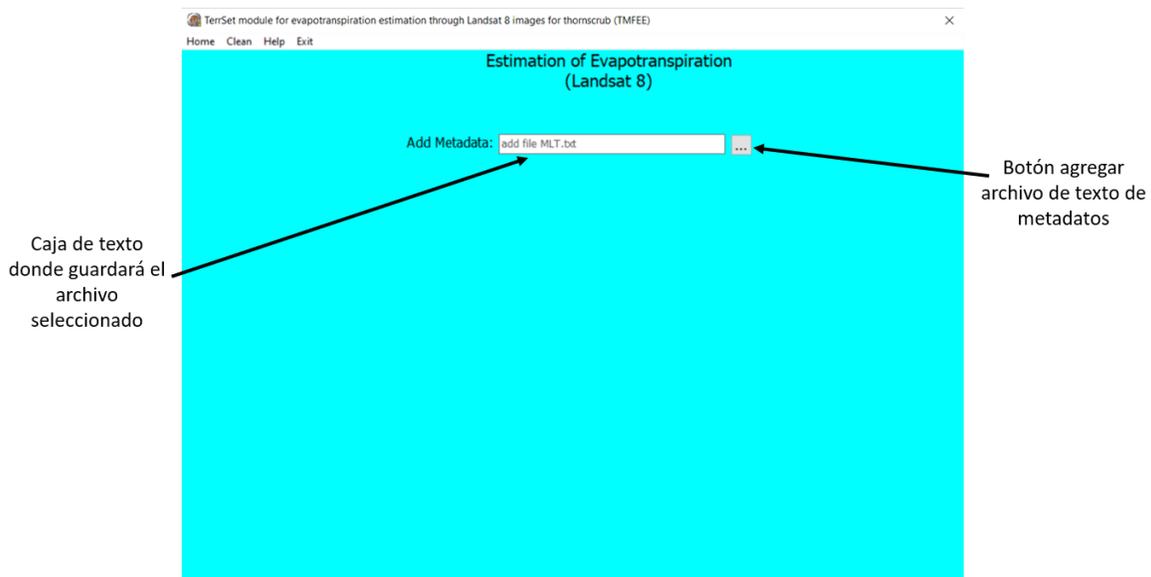


Figura 7.6 Entrada de metadatos

Al clicar el botón  automáticamente abre la ventana *Pick List*, el cual permite seleccionar el archivo metadatos de las imágenes Landsat 8 en la ruta donde el usuario conecta la carpeta recursos al iniciar un proyecto dentro de TerrSet.

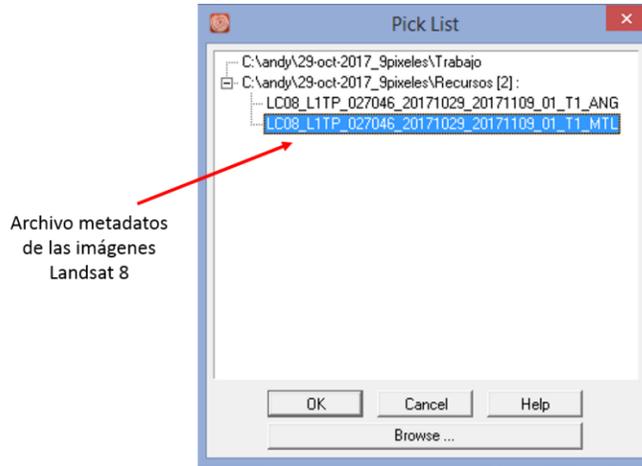


Figura 7.7 Ingreso de metadatos formato .txt

En el momento de seleccionar el archivo metadatos, automáticamente se despliega una serie de parámetros que son completados por los metadatos y otros que deben ser completados por el usuario. En esta sección se debe agregar los datos climatológicos próximos a la hora de paso del satélite (esto correspondiente con los metadatos de la imagen Landsat utilizada). Es importante recordar que el horario de la imagen y los registros climatológicos debe ser correcto, por lo que se debe ajustar de ser necesario considerando que la imagen de satélite presenta horario UTC.

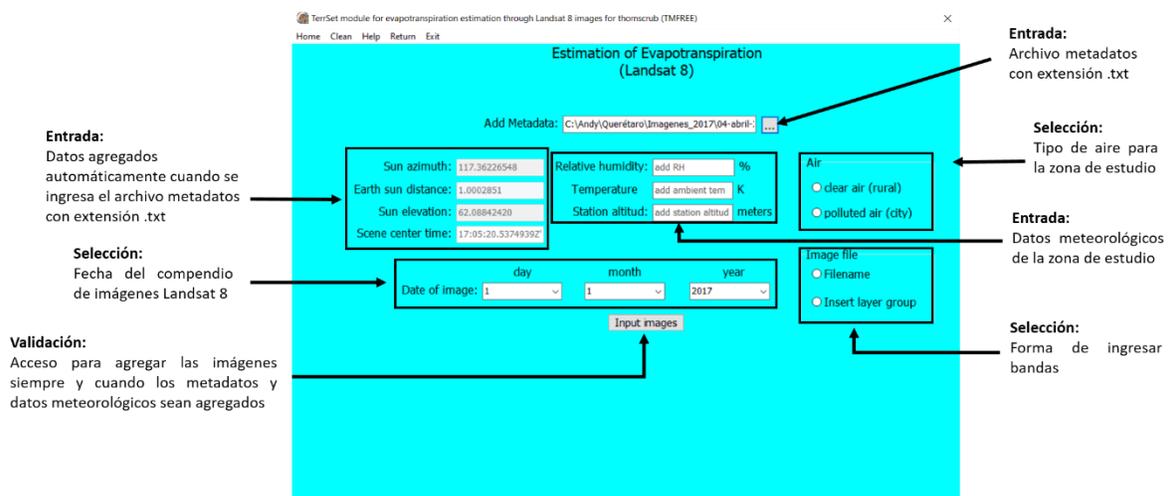


Figura 7.8 Entrada de datos

Si el usuario elige ingreso de bandas una a una (*filename*), se debe clicar el botón **Input images**, el cual automáticamente despliega las casillas donde se deberán seleccionar las bandas Landsat 8 (Formato .tiff).

Estimation of Evapotranspiration (Landsat 8)

Add Metadata: C:\Andy\Querétaro\Imágenes_2017\04-abril-: ...

Sun azimuth: 117.36226548 Relative humidity: 60.9380 %
Earth sun distance: 1.0002851 Temperature: 291.8361 K
Sun elevation: 62.08842420 Station altitude: 2048 meters
Scene center time: 17:05:20.5374939Z

Day: 29 Month: 10 Year: 2017

Input images

Air
 clear air (urban)
 polluted air (city)

Add Band 2: add file .rst ... Add Band 5: add file .rst ... Add Band 10: add file .rst ...
Add Band 3: add file .rst ... Add Band 6: add file .rst ... Add Band 11: add file .rst ...
Add Band 4: add file .rst ... Add Band 7: add file .rst ... Banda BQA: add file .rst ...

preprocessing

Casillas de cada banda

Figura 7.9 Entrada de bandas Landsat 8

Al clicar el botón **...** despliega automáticamente la ventana Pick List, el cual permite seleccionar banda por banda.

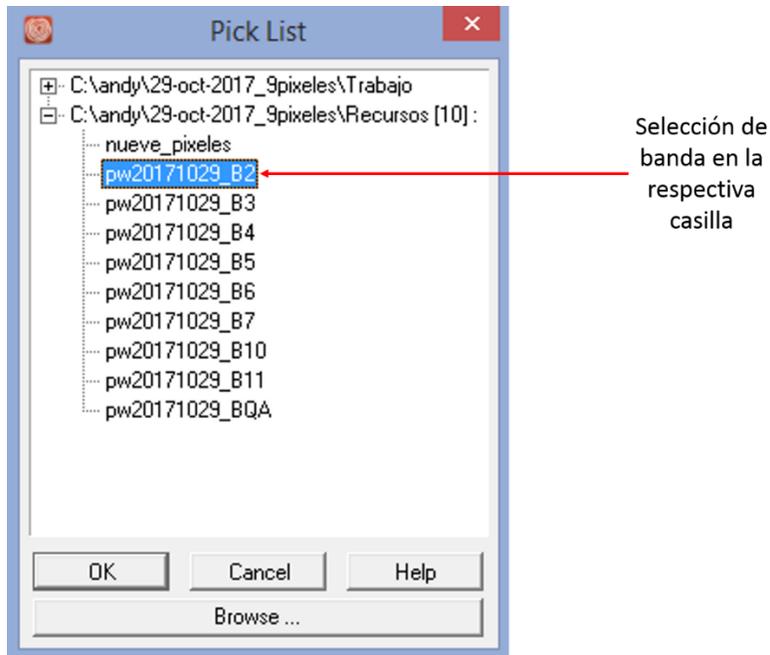


Figura 7.10 Ingreso banda por banda para estimación de (Rn)

Completando cada casilla con la banda correspondiente

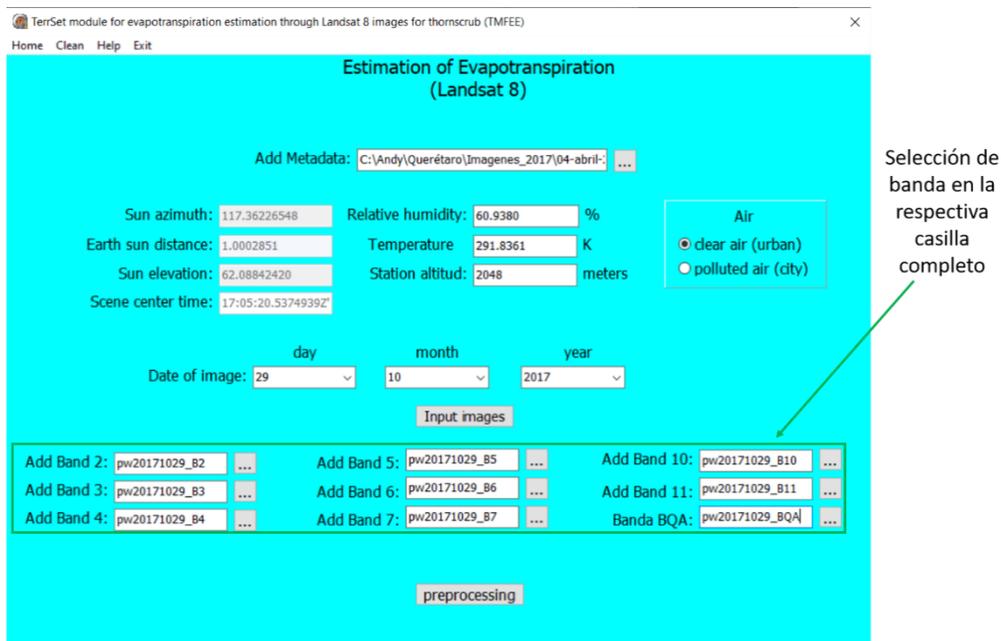


Figura 7.11 Selección de bandas Landsat 8

Pre-procesamiento

Con este paso completo, se tienen todos los elementos necesarios para correr el proceso al clicar el botón **preprocessing** comienza la automatización de la fórmula.

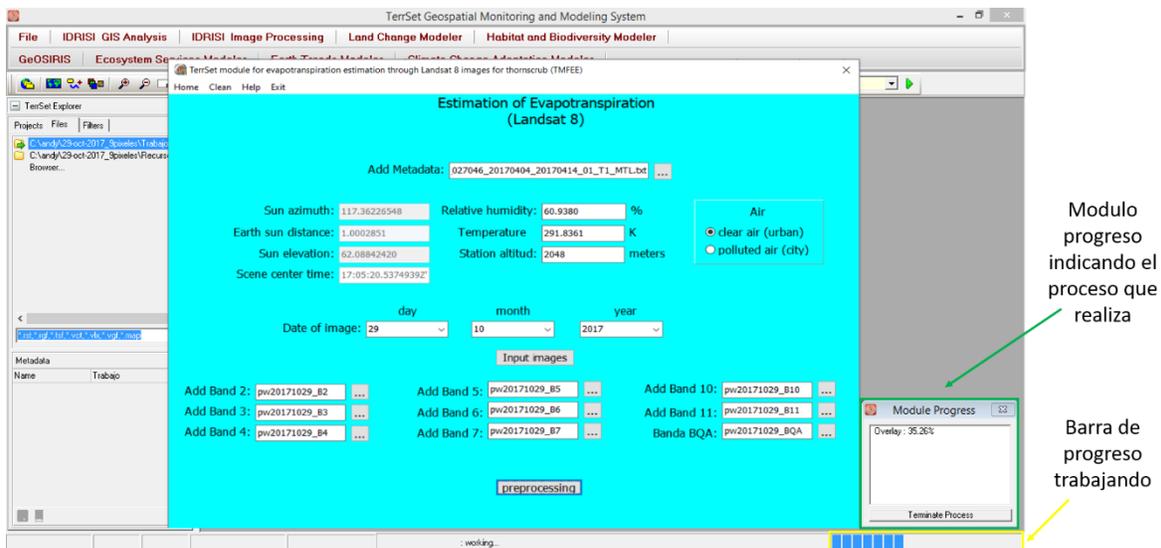


Figura 7.12 Pre-procesamiento banda por banda del módulo TMFREE

Cuando termina el proceso automáticamente el módulo muestra un mensaje que indica el final del pre-procesamiento se ha realizado con éxito.

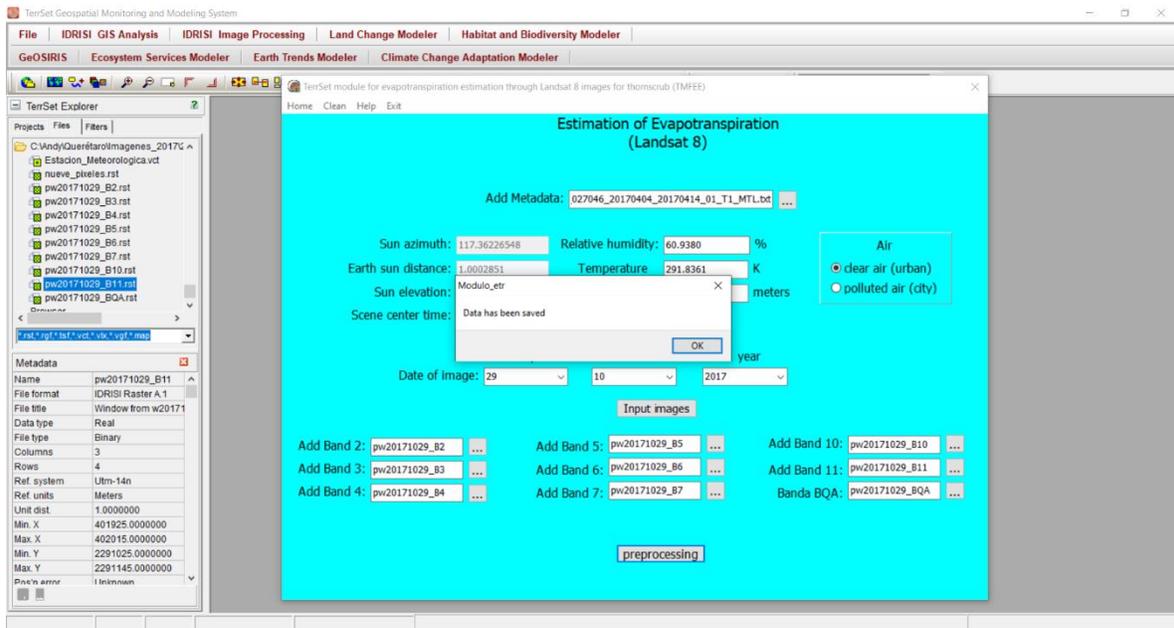


Figura 7.13 Pre-procesamiento banda por banda completado

Si el usuario elige ingreso de bandas mediante un grupo de imágenes (*Raster group*), se debe clicar el botón **Input images**, el cual automáticamente despliega las casillas donde se deberán seleccionar las bandas Landsat 8 en grupo (Formato .tiff).

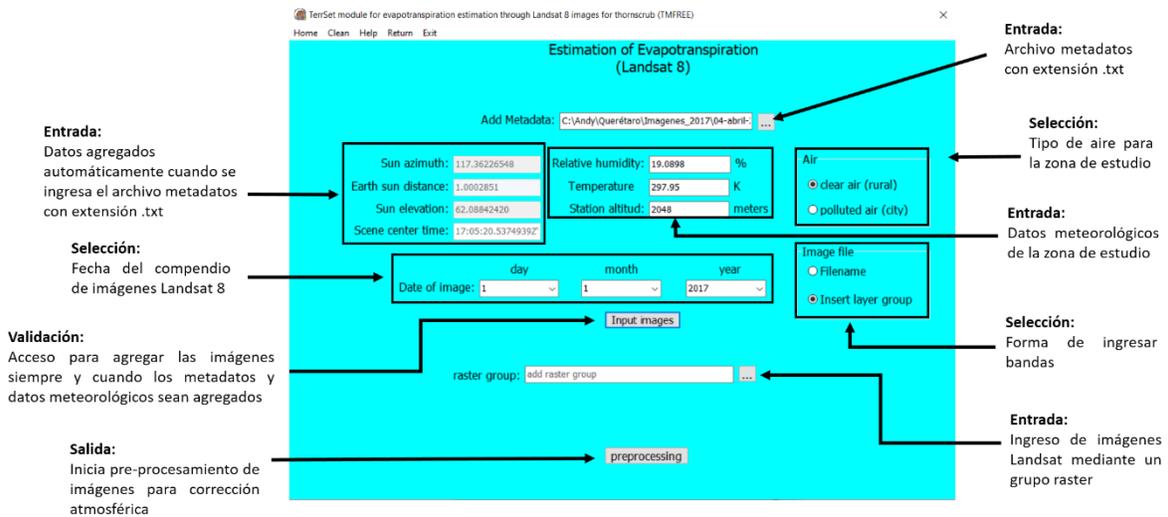


Figura 7.14 Ingreso de datos mediante raster group

Al clicar el botón  despliega automáticamente la ventana Pick List, el cual permite seleccionar el grupo raster con las 9 bandas.

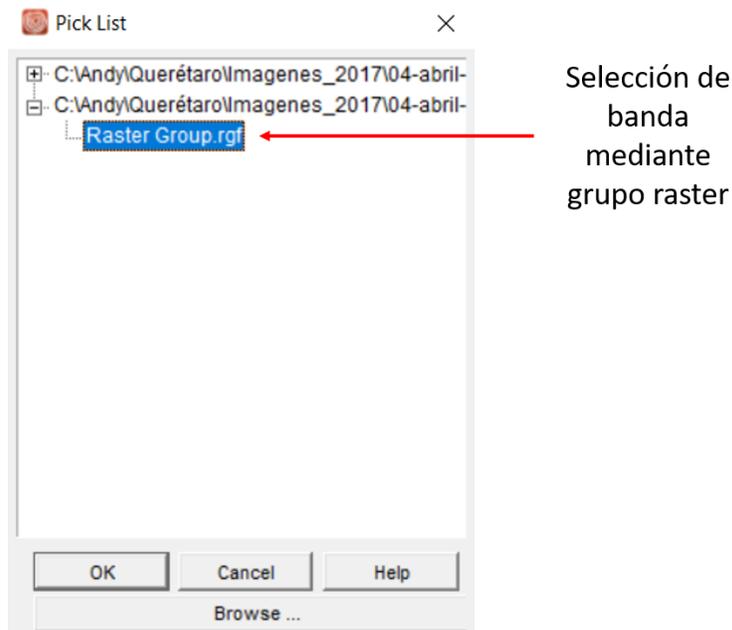


Figura 7.15 Ingreso de bandas mediante grupo raster

Con este paso completo, se tienen todos los elementos necesarios para correr el proceso al clicar el botón **preprocessing** comienza la automatización de la fórmula.

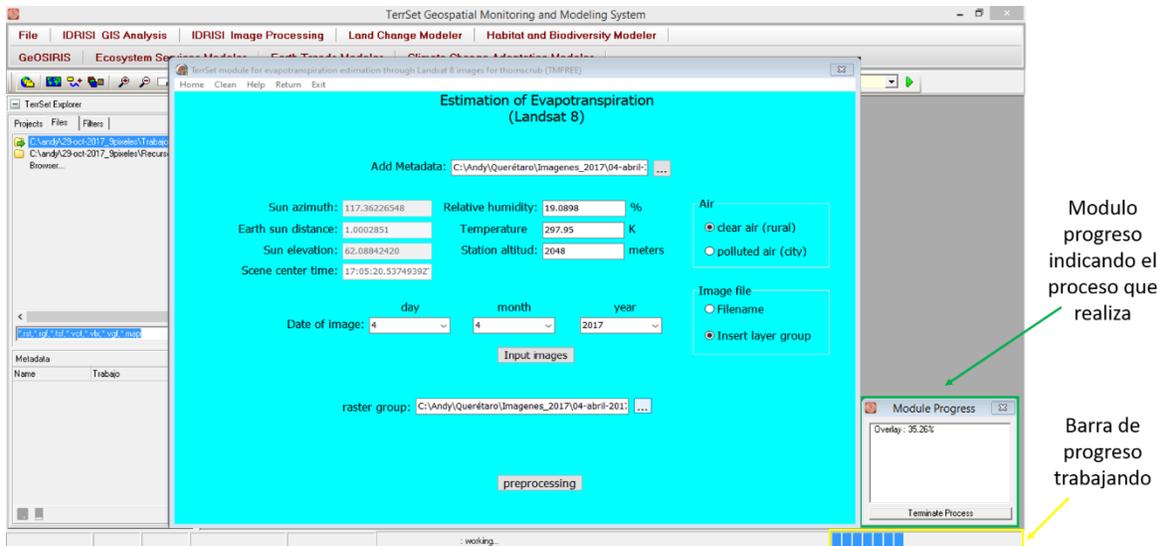


Figura 7.16 Pre-procesamiento mediante grupo raster del módulo TMFREE

Cuando termina el proceso automáticamente el módulo muestra un mensaje que indica el final del pre-procesamiento se ha realizado con éxito.

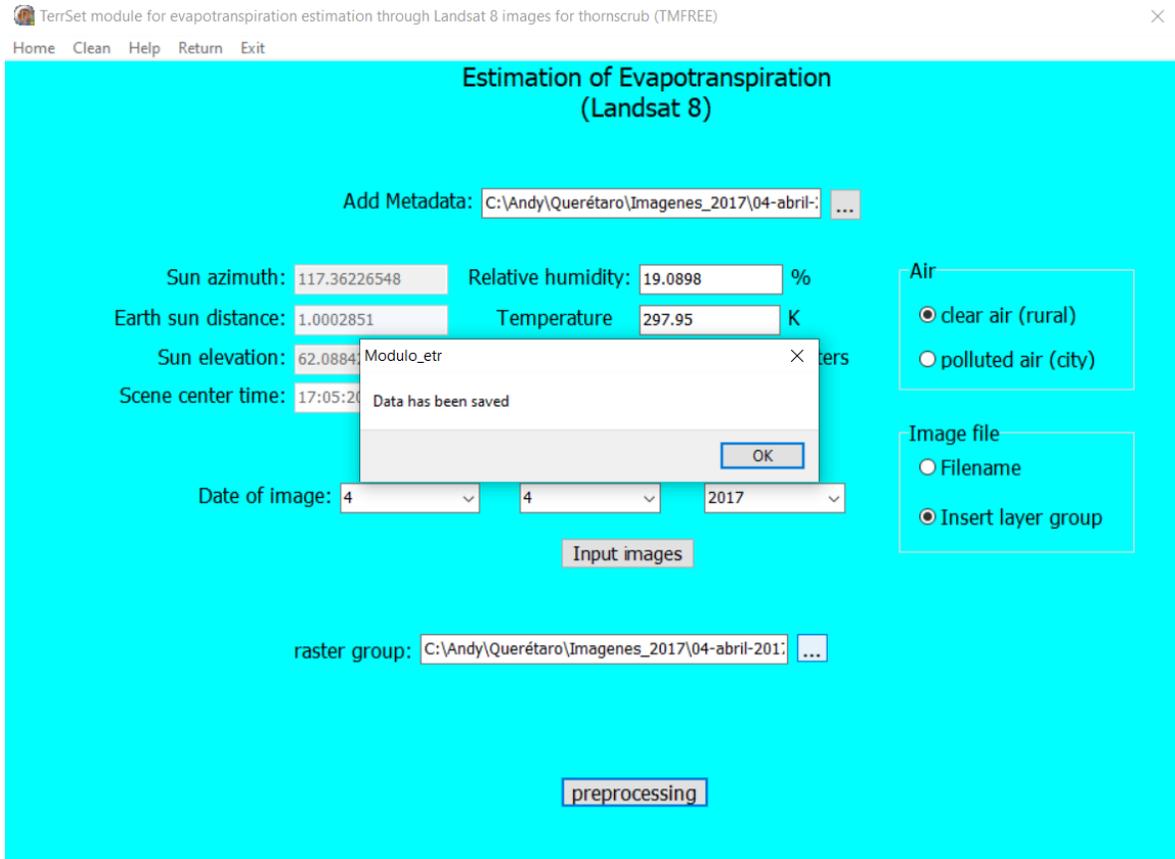


Figura 7.17 Pre-procesamiento por grupo raster completado

Estimación de Evapotranspiración

Con los datos de entrada dentro del módulo TMFREE se da inicio al ciclo propuesto en la interfaz principal para la estimación de la ET.

2) Índices de vegetación

La ventana para estimar los índices de vegetación (**Figura 7.18**) integra tres casillas para colocar el nombre de salida de (NDVI, SAVI, LAI), teniendo como resultado tres imágenes con formato .rst.

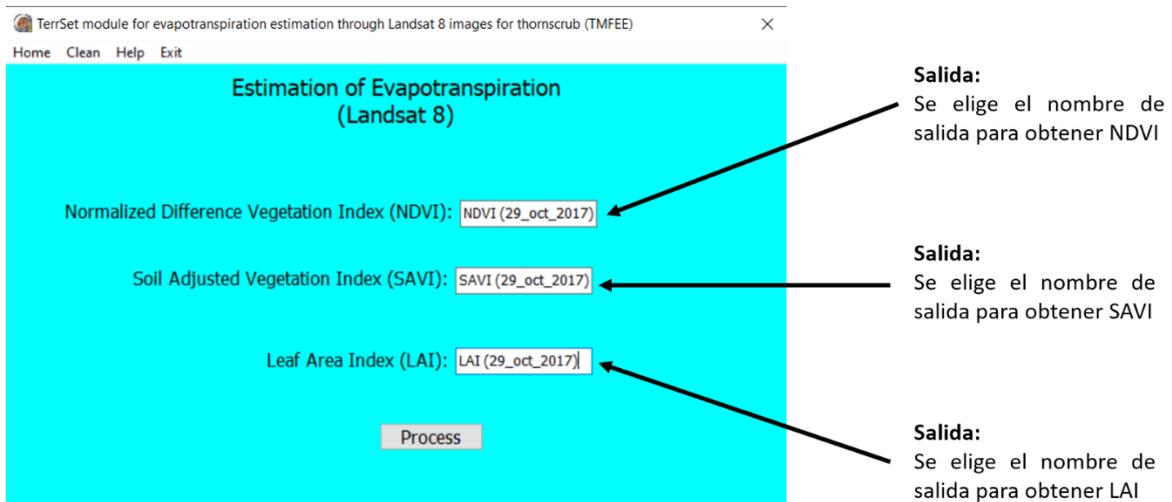


Figura 7.18 Nombre de salida estimación de índices de vegetación

Al finalizar la estimación se muestra en pantalla las tres imágenes con el nombre de salida seleccionado (*Figura 7.19*).

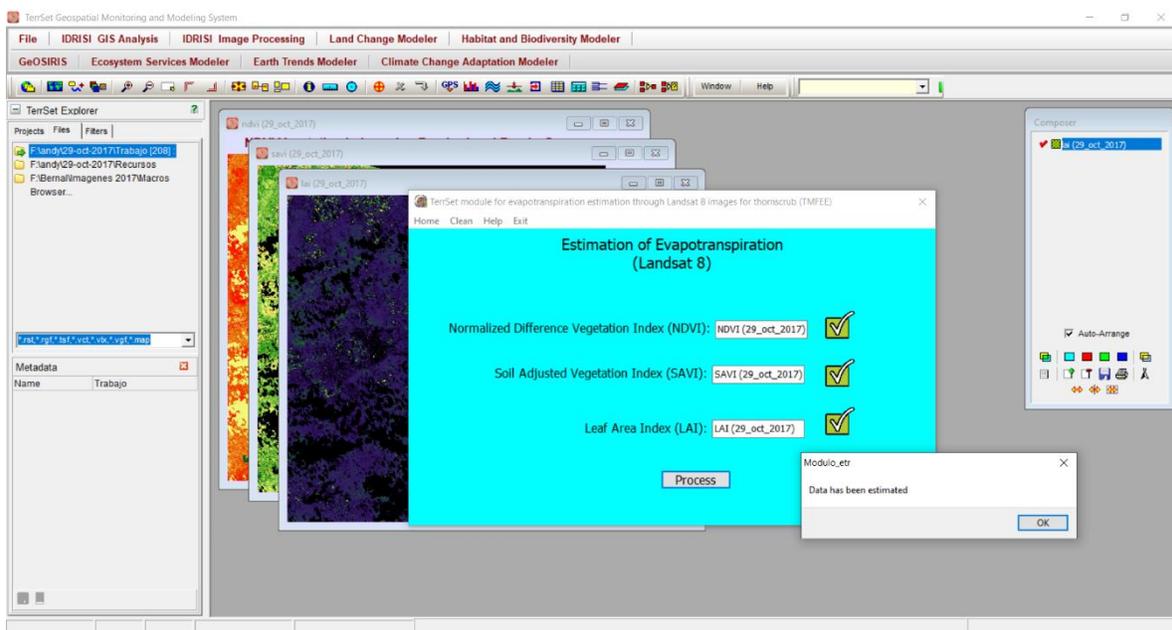


Figura 7.19 Estimación de índices de vegetación terminada

3) Radiación de onda corta entrante ($R_{s\downarrow}$)

En el botón de $R_{s\downarrow}$ se generó el procesos con salida numérica, la estimación de Radiación de onda corta entrante (**Figura 7.20**). El resultado fue guardado en la memoria del submódulo para ser utilizados para completar el ciclo y llegar a la estimación de ET.

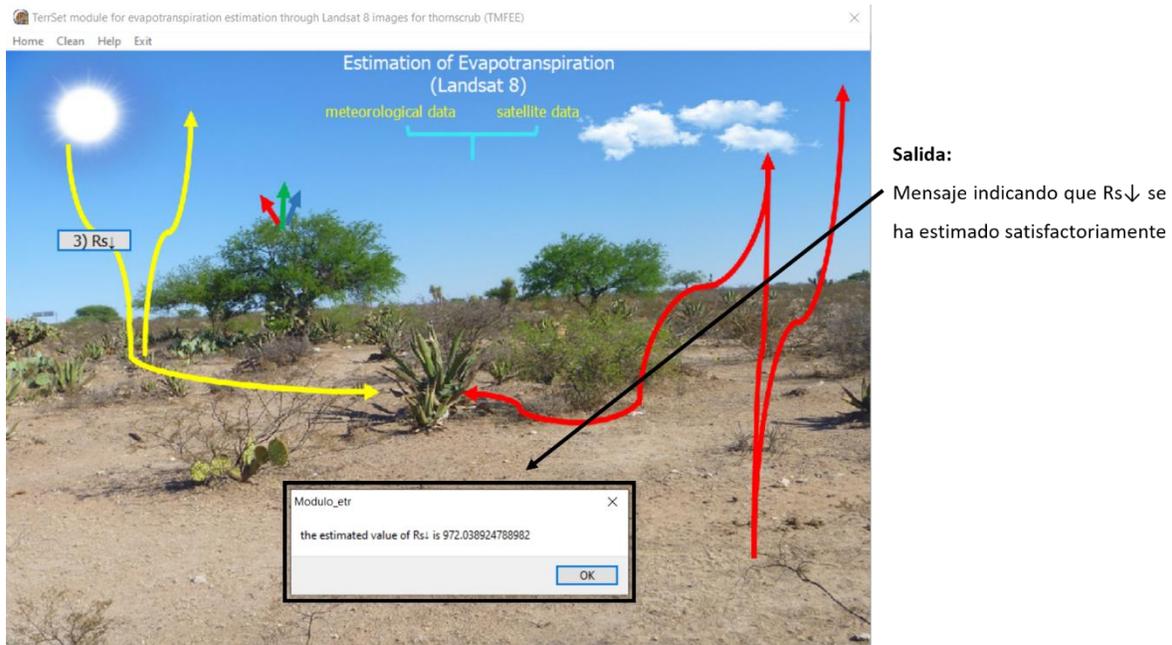


Figura 7.20 Estimación de radiación de onda corta entrante terminada

4) Albedo de superficie (α)

La ventana para estimar albedo de superficie (**Figura 7.21**) integra una casilla para colocar el nombre de salida teniendo como resultado una imagen con formato .rst.

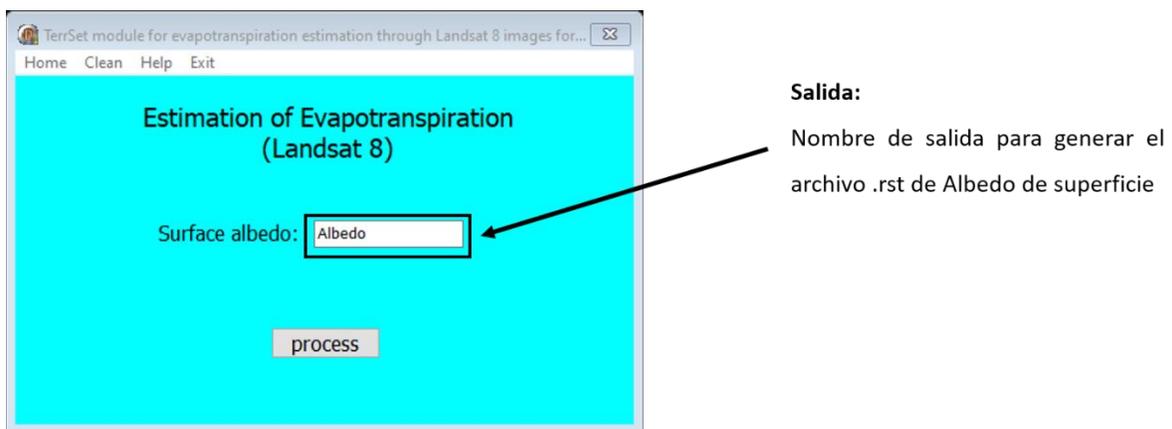


Figura 7.21 Nombre de salida estimación de albedo de superficie

Al finalizar la estimación se muestra en pantalla la imagen con el nombre de salida seleccionado (*Figura 7.22*).

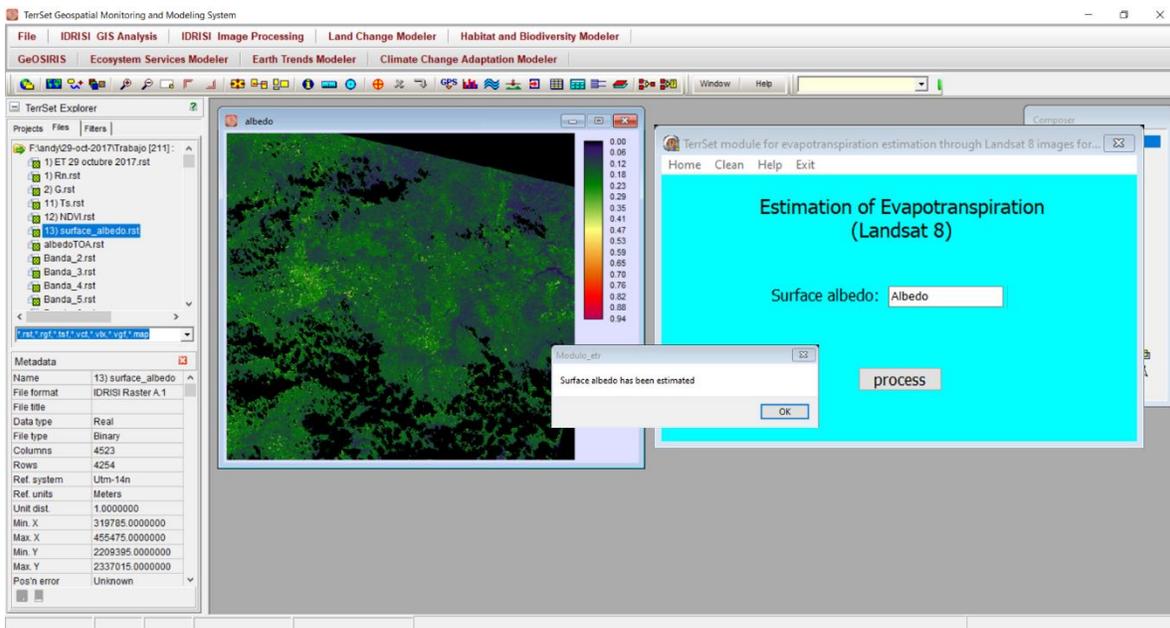
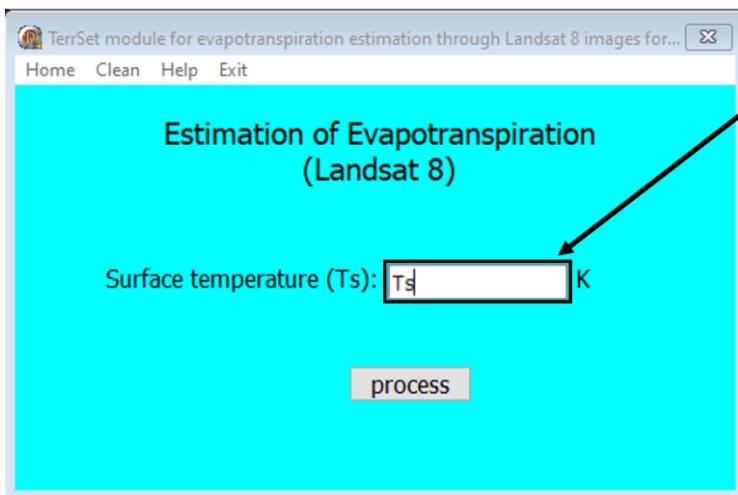


Figura 7.22 Estimación de albedo de superficie terminada

5) Temperatura de superficie (Ts)



Salida:
Nombre de salida para generar el archivo .rst de Temperatura de superficie

Figura 7.23 Nombre de salida estimación temperatura de superficie

Al finalizar la estimación se muestra en pantalla la imagen con el nombre de salida seleccionado (*Figura 7.24*).

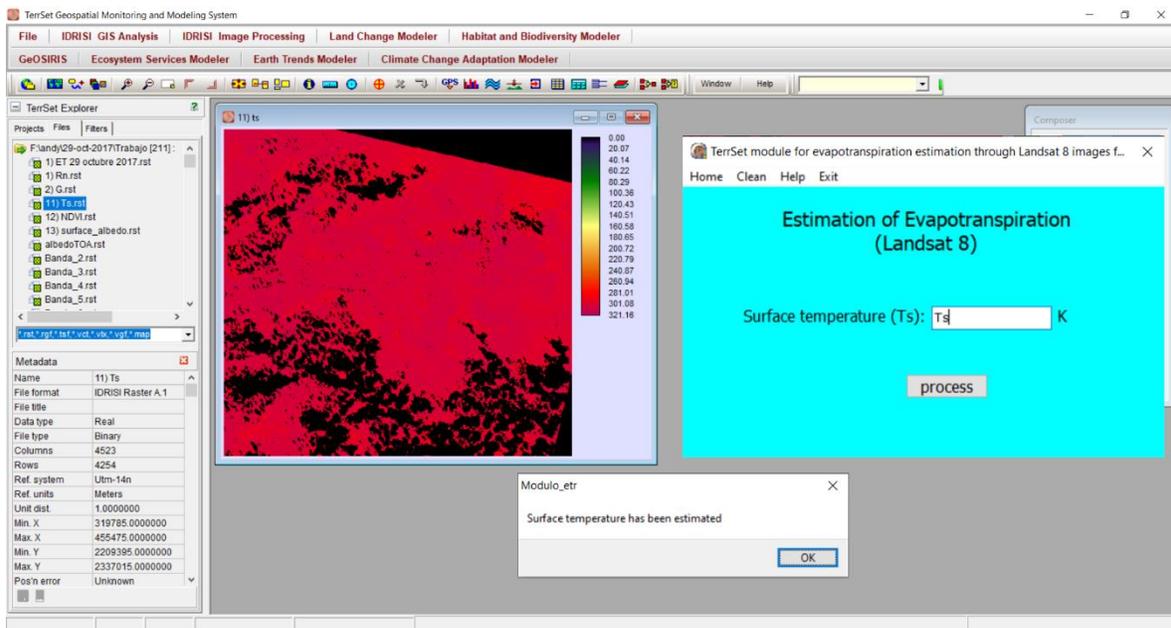


Figura 7.24 Estimación de temperatura de superficie terminada

6) Radiación de onda larga saliente ($R_{L\uparrow}$)

La ventana para estimar radiación de onda larga saliente (*Figura 7.25*) integra dos casillas, la primera fue la estimación de $R_{L\uparrow}$ y la segunda fue para estimar emisividad de superficie a fin de colocar el nombre de salida teniendo como resultado dos imágenes con formato .rst.

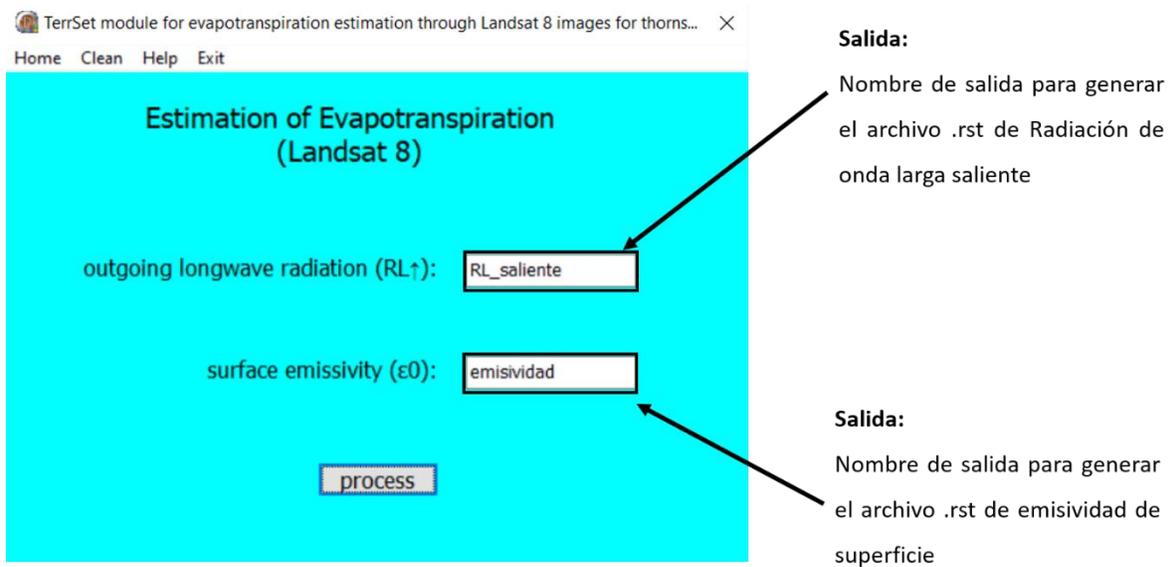


Figura 7.25 Nombre de salida estimación de radiación de onda larga saliente

Al finalizar la estimación se muestra en pantalla la imagen con el nombre de salida seleccionado (**Figura 7.26**).

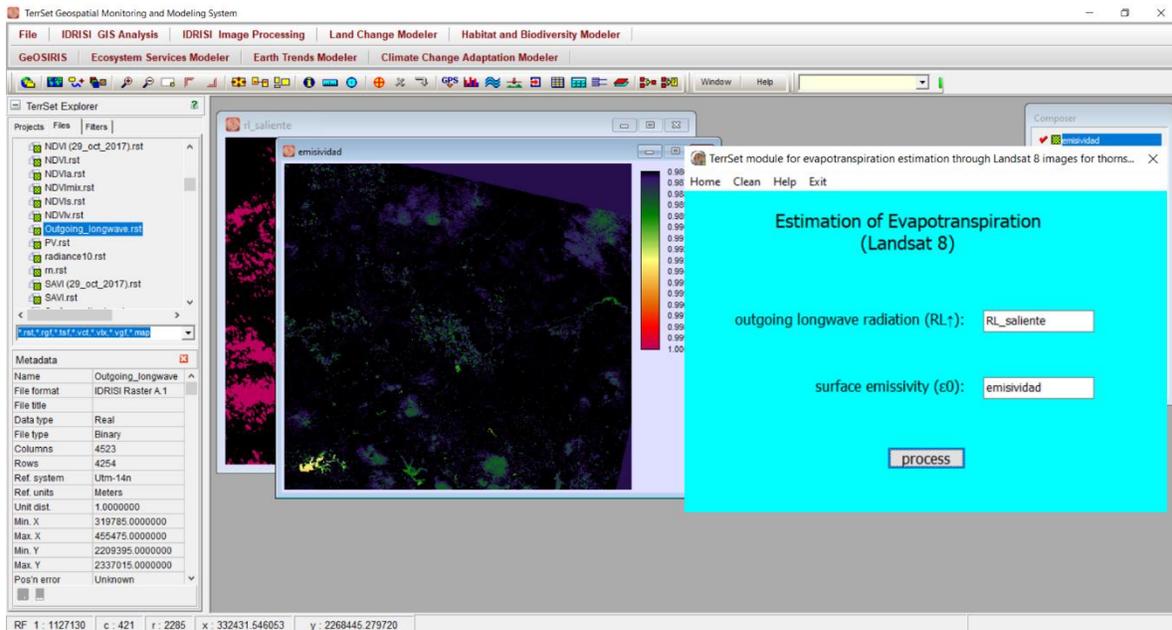
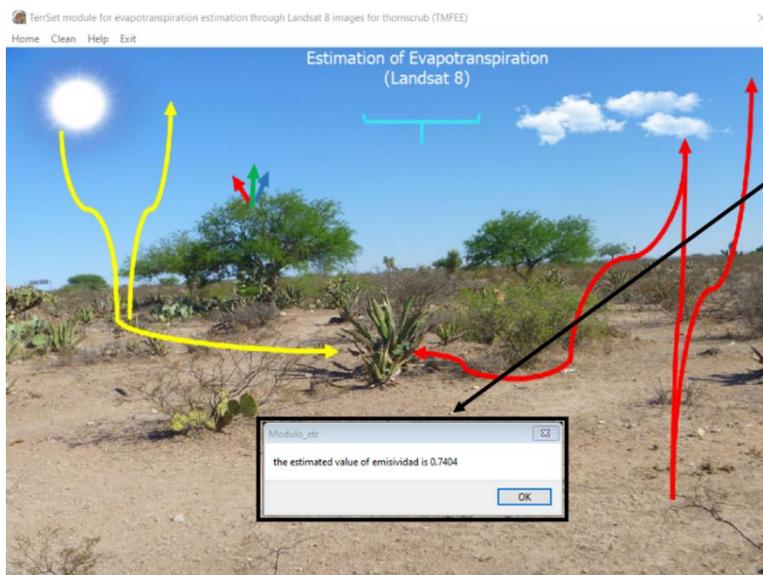


Figura 7.26 Estimación de radiación de onda larga saliente terminada

7) Radiación de onda larga entrante ($R_{L\downarrow}$)

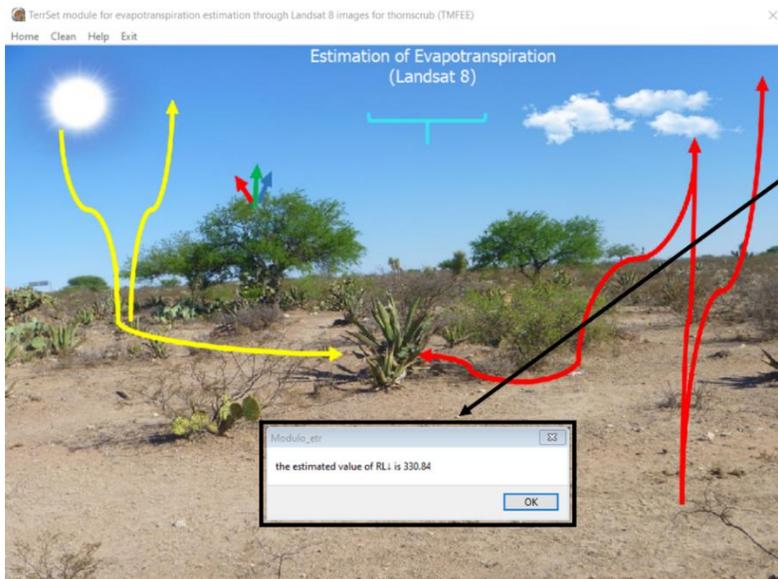
En el botón de $R_{L\downarrow}$ se generaron dos procesos con salida numérica, el primero es la estimación de emisividad atmosférica (*Figura 7.27*) y el segundo es la estimación de $R_{L\downarrow}$ (*Figura 7.28*). Ambos resultados fueron guardados en la memoria del submódulo para ser utilizados para completar el ciclo y llegar a la estimación de ET.



Salida:

Mensaje indicando que emisividad se ha estimado satisfactoriamente

Figura 7.27 Ventana para la estimación de emisividad



Salida:

Mensaje indicando que Radiación de onda larga entrante se ha estimado satisfactoriamente de forma numérica

Figura 7.28 Ventana para la estimación de radiación de onda larga entrante

8) Radiación neta (Rn)

Para la obtención de Radiación neta se estimó de acuerdo a la fórmula propuesta de acuerdo con Allen et al., (2002) la cual permite elegir al usuario tres elementos (albedo de superficie, radiación de onda larga saliente, emisividad de superficie) previamente estimados, así como colocar el nombre de salida para el componente del balance de energía, radiación neta como se muestra en la ventana (*Figura 7.29*).

Entrada:
Archivo correspondiente al albedo con extensión .rst

Entrada:
Archivo correspondiente a la radiación de onda larga saliente con extensión .rst

Entrada:
Archivo correspondiente a la emisividad de superficie con extensión .rst

Salida:
Nombre de salida para generar el archivo correspondiente a la radiación neta con extensión .rst

Proceso:
Botón que inicia el proceso para estimar el archivo correspondiente a la radiación neta con extensión .rst

Figura 7.29 Nombre de salida estimación radiación neta

Al finalizar la estimación se muestra en pantalla la imagen con el nombre de salida seleccionado (*Figura 7.30*).

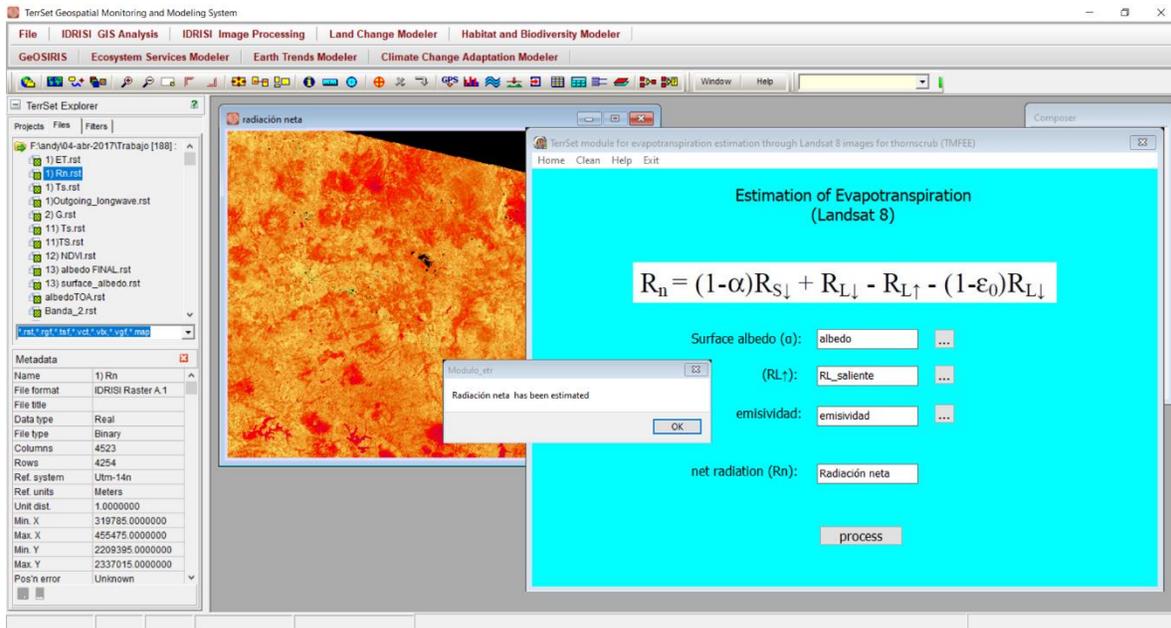


Figura 7.30 Estimación de radiación neta terminada

9) Evapotranspiración

La ventana para estimar evapotranspiración (**Figura 7.31**) es el final del ciclo por lo cual es la integración de imágenes .rst estimadas anteriormente, por lo cual necesitó tres imágenes de entrada (NDVI, Ts, Rn). La cuarta casilla sirvió para colocar el nombre de salida teniendo como resultado una imagen con formato .rst.

Entrada:
Archivo correspondiente al NDVI con extensión .rst

Entrada:
Archivo correspondiente a la temperatura de superficie con extensión .rst

Entrada:
Archivo correspondiente a la radiación neta con extensión .rst

Salida:
Nombre de salida para generar el archivo correspondiente a la evapotranspiración con extensión .rst

Proceso:
Botón que inicia el proceso para estimar el archivo correspondiente a la evapotranspiración con extensión .rst

Figura 7.31 Nombre de salida estimación de evapotranspiración

Al finalizar la estimación se muestra en pantalla la imagen con el nombre de salida seleccionado (*Figura 7.32*).

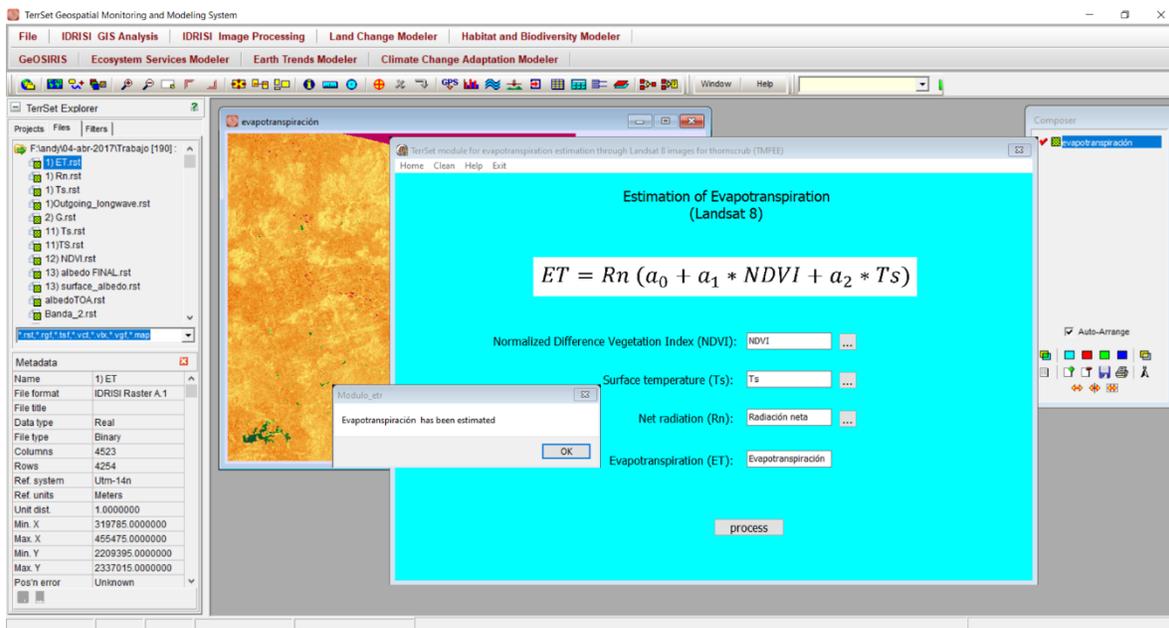


Figura 7.32 Estimación de evapotranspiración terminada

Para regresar al menú de inicio basta con dirigirse a la barra de herramientas **Home > ET Calculation** el cual manda al inicio.

Repetir proceso

Si se requiere repetir el proceso con otro grupo de imágenes, basta con seleccionar el botón **Clean** y automáticamente limpia las casillas y repetir el proceso iniciando por el archivo de los metadatos.