

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
E.T.S. DE INGENIEROS EN TOPOGRAFÍA GEODESIA Y CARTOGRAFÍA

**DESARROLLO DE UN MODELO DE GEOPROCESAMIENTO PARA LA
VALORACIÓN PRODUCTIVA Y TRIBUTARIA DE TIERRAS AGRÍCOLAS
EN VENEZUELA**

TESIS DOCTORAL

Oscar Abarca

Ing. Agrónomo, MSc.

Madrid, 2010

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
E.T.S. DE INGENIEROS EN TOPOGRAFÍA GEODESIA Y CARTOGRAFÍA
DPTO. DE INGENIERÍA TOPOGRÁFICA Y CARTOGRAFÍA

**DESARROLLO DE UN MODELO DE GEOPROCESAMIENTO PARA LA
VALORACIÓN PRODUCTIVA Y TRIBUTARIA DE TIERRAS AGRÍCOLAS
EN VENEZUELA**

TESIS DOCTORAL

Autor: Oscar Abarca
Director: Miguel Ángel Bernabé Poveda
Madrid, 2010



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

Tribunal nombrado por el Mgfco. y Excmo. Sr. Rector de la Universidad Politécnica de Madrid, el día 28 de Mayo de 2010.

Presidente: D. José Luis Berné Valero

Vocal: D. Francisco Javier Ariza López

Vocal: D. Francisco García Cepeda

Vocal: Da. María Nilda Sánchez Martín

Secretario: D. Miguel Ángel Manso Callejo

Suplente: D. Ángel García San Román

Suplente: Da. María del Pilar Martín Isabel

Realizado el acto de defensa y lectura de la Tesis el día 7 de Junio de 2010, en la E.T.S.I. en Topografía, Geodesia y Cartografía.

EL PRESIDENTE

LOS VOCALES

EL SECRETARIO

AGRADECIMIENTOS

Al Doctor Miguel Ángel Bernabé Poveda, del Departamento de Ingeniería Topográfica y Cartografía, de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM), por haber aceptado la Dirección de la tesis y por sus acertadas orientaciones en diversos aspectos de la misma, así como por su consentimiento para ejercer la guiatra durante el programa de doctorado y la confianza depositada en mí para el desarrollo de las actividades correspondientes.

A la profesora Brunilde Mendoza, de la Facultad de Agronomía, de la Universidad Central de Venezuela (UCV), por sus invalorable actividades administrativas como Tutora Académica, indispensables para tramitar los recursos que permitieron mi permanencia en España.

A los miembros de la Comisión Especial Agraria del Estado Aragua-Actividades 2 y 4, con los que participé en las actividades de campo y gabinete que permitieron el levantamiento, recolección y actualización de la información básica utilizada en el desarrollo de este trabajo. Al prof. Marco Azpúrua, de la Facultad de Agronomía de la UCV, a las ingenieras Ligmar López y Joei Guillén, a los ingenieros Lucilio Gómez y José Quiroz, así como a los bachilleres pasantes Gabriel Machado, Gertrudis Álvarez, Anahí Carmona y Mariana Araque, todos miembros de la Comisión, sin cuyo trabajo esta investigación no fuera sido posible.

Al Departamento de Edafología-Facultad de Agronomía de la UCV que suministró parte de la información básica utilizada a través de su base de datos SISDELAV.

Al Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico de la Universidad Central de Venezuela, institución que financió los gastos de manutención y estudios del programa de doctorado.

Al Laboratorio de Tecnologías de la Información Geográfica (LatinGEO), UPM-Instituto Geográfico Nacional de España, por permitirme aprender de su eficiencia.

Finalmente un agradecimiento especial a mi esposa e hijos por su infinita paciencia y apoyo durante el desarrollo del programa de doctorado.

RESUMEN

En esta tesis se desarrolla un geoproceso para la predicción de la *Capacidad de Uso* de las tierras agrícolas del Estado Aragua-Venezuela, mediante el ajuste de un modelo de regresión logística multinomial. Se generaron 38 variables geomorfométricas, mediante el procesamiento de un DEM derivado de las imágenes radar SRTM, de imágenes Landsat ETM+ y de información climatológica del área. En definitiva se seleccionaron 19 variables como predictoras del modelo y se obtuvo un ajuste a nivel regional con un pseudo R^2 de 0.48, estadísticamente significativo ($p \approx 0$), y un Índice Kappa global de 76%. Igualmente se desarrolló un geoproceso para predecir la *Vocación de Uso* en el área de estudio, a partir de 6 índices equivalentes a los componentes físico-naturales, socio-económicos y políticos de la definición de *Vocación de Uso*. Los componentes físico-naturales y políticos se valoran de estudios previos y los componentes socio-económicos se derivan de un índice integrado construido a partir de Modelos de Elevación de la *Densidad Vial*, la *Densidad de Centros Poblados* y la *Densidad de Cuerpos de Agua*, el *Balance Hídrico Regional* y las variables geomorfométricas *Acumulación de Flujo* e *Índice Topográfico de Humedad*. Finalmente se desarrolló un geoproceso para la *Valoración Tributaria* de las tierras del Estado. Este modelo requiere como entrada la definición de la *Vocación de Uso* de los predios sujetos a tributación, así como los resultados productivos durante el ejercicio fiscal. La aplicación del modelo en diferentes escenarios permitió determinar un adecuado diseño de las opciones de cálculo de la *Base Imponible* del impuesto así como de los modelos de *Capacidad y Vocación de Uso* desarrollados. Igualmente se comprobó la intencionalidad del impuesto de gravar progresivamente los predios menos productivos.

Palabras clave: Geoproceso, Geomorfometría, Capacidad de Uso de la Tierra, Vocación de Uso de la Tierra, Impuesto Predial, Regresión Logística Multinomial, Venezuela.

ABSTRACT

In this thesis a geoprocess is developed for prediction of the *Use Capability* of the farm lands of the Aragua State in Venezuela through the adjustment of a multinomial logistic regression model. Thirty-eight geomorphometric variables were generated through the processing of a DEM derived from SRTM radar images, Landsat ETM+ images and climatologic information of the area. In the final analysis 19 variables were selected as predictors of the model and an adjustment at the regional level was obtained with a pseudo R^2 of 0.48, statistically significant ($p \approx 0$), and a global kappa index of 76%. Likewise, a geoprocess was developed to predict the *Land Use Vocation* within the study area, working from six indexes equivalent to the physical-natural, socioeconomic and political components of the *Land Use Vocation* definition. The physical-natural and political components are assessed from previous studies and the socioeconomic components are derived from an integrated index built from the DEMs of the *Road Density*, the *Populated Center Density*, the *Water Bodies Density*, in addition to the *Regional Water Balance* and the geomorphometric variables *Flow Accumulation* and *Topographic Wetness Index*. Finally a geoprocess was developed for *Tax Appraisal* of the State lands. This model requires as input the definition of *Land Use Vocation* of the properties that are subject to tax, as well as the productive outcome during the fiscal year. The application of the model in different settings allowed defining an appropriate design of the calculation options of the *Tax Base* and the *Land Use Capability* and *Vocation* being developed. Furthermore, the intent on taxing the least productive properties progressively was substantiated.

Keywords: Geoprocess, Geomorphometry, Land Use Capability, Land Use Vocation, Estate Tax, Multinomial Logistic Regression, Venezuela.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. INTRODUCCIÓN	2
1.2. OBJETIVOS	6
1.2.1. General.....	6
1.2.2. Específicos.....	6
1.3. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN	6
1.4. METODOLOGÍA EMPLEADA Y MATERIALES DISPONIBLES	7
1.4.1. Metodología.....	7
1.4.1.1. Revisión bibliográfica	8
1.4.1.2. Geoproceso para la predicción de la Capacidad de Uso de la Tierra.....	8
1.4.1.3. Geoproceso para la predicción de la Vocación de Uso de la Tierra	9
1.4.1.4. Geoproceso para el cálculo de la Tributación Territorial	9
1.4.2. Materiales	9
1.5. ESTRUCTURA DE LA TESIS	11
2. IMPUESTO TERRITORIAL Y VALORACIÓN PRODUCTIVA DE LAS TIERRAS AGRÍCOLAS EN VENEZUELA	13
2.1. INTRODUCCIÓN	14
2.2. MARCO LEGISLATIVO VENEZOLANO	14
2.3. MODELO PEDOGENÉTICO DEL SUELO.....	18
2.4. CAPACIDAD DE USO DE LA TIERRA	22
2.5. ESCALA CARTOGRÁFICA EN LA VALORACIÓN DE LAS TIERRAS	28
2.6. SÍNTESIS	30
3. MODELO ESTADÍSTICO DE PREDICCIÓN DE SUELOS.....	31
3.1. INTRODUCCIÓN	32
3.2. MODELO DE REGRESION LOGÍSTICA MULTINOMIAL.....	32
3.3. BONDAD DE AJUSTE DEL MODELO LOGÍSTICO	37
3.4. ANÁLISIS DEL ERROR DE CLASIFICACIÓN	39
3.5. SÍNTESIS	46

4. VARIABLE DEPENDIENTE. EL ÁREA DE ESTUDIO	47
4.1. INTRODUCCIÓN	48
4.2. ÁREA DE ESTUDIO	48
4.2.1. Valles Marinos de la Cordillera de la Costa.....	50
4.2.2. Serranía del Litoral	50
4.2.3. Serranía del Interior	50
4.2.4. Depresión del Lago de Valencia	50
4.2.5. Llanos Centrales	50
4.3. ÁREAS DE REFERENCIA PARA EL MODELO DE PREDICCIÓN	53
4.3.1. Cuenca Alta del Río El Limón.....	54
4.3.2. Cuenca del Río Aragua	57
4.3.3. Cuenca Alta del Río Guárico	58
4.3.4. Sector Tocarón.....	60
4.3.5. Sector La Peñita.....	61
4.4. SÍNTESIS	63
5. VARIABLES INDEPENDIENTES. PREDICTORAS GEOMORFOMÉTRICAS	64
5.1. INTRODUCCIÓN	65
5.2. VARIABLES PREDICTORAS DEL MODELO	65
5.3. VARIABLES Y ELEMENTOS MORFOMÉTRICOS BÁSICOS	67
5.3.1. Pendiente, Orientación y Curvatura del terreno	68
5.3.2. Índice de Convergencia.....	69
5.3.3. Dimensión Fractal.....	70
5.3.4. Índice de Llanura de Fondos de Valles y de Cimas de Crestas	71
5.3.5. Índice de Protección Morfométrica.....	72
5.4. VARIABLES Y ELEMENTOS ESPECÍFICOS DE LA HIDROLOGÍA	73
5.4.1. Algoritmos de Flujo	73
5.4.2. Longitud de las Vías de Flujo	75
5.4.3. Longitud de Pendientes.....	75
5.4.4. Acumulación de Flujo.....	76
5.4.5. Índice Topográfico de Humedad (TWI).....	77

5.4.6. Índice de Potencia de Flujo (SPI).....	77
5.4.7. Índice de Transporte de Sedimentos (STI).....	77
5.4.8. Balance Neto.....	78
5.4.9. Ancho de Flujo	78
5.5. VARIABLES Y ELEMENTOS ESPECÍFICOS DE LA TOPO- CLIMATOLOGÍA	79
5.5.1. Radiación solar potencial	80
5.5.2. Calor anisotrópico diurno.....	80
5.5.3. Balance hídrico del suelo	81
5.5.4. Índice de vegetación	85
5.6. SÍNTESIS	87
6. DESARROLLO METODOLÓGICO	88
6.1. INTRODUCCIÓN	89
6.2. MODELO DE GEOPROCESAMIENTO PARA LA PREDICCIÓN DE LA CAPACIDAD DE USO DE LA TIERRA	89
6.2.1. Obtención y preparación del Modelo Digital de Elevación (DEM)	91
6.2.2. Obtención de las variables geomorfométricas.....	96
6.2.2.1. Variables geomorfométricas básicas	96
6.2.2.2. Variables geomorfométricas hidrológicas	96
6.2.2.3. Variables geomorfométricas topo-climatológicas	100
6.2.3. Ajuste del modelo de regresión.....	105
6.2.4. Validación del modelo de regresión.....	109
6.2.4.1. Validación del modelo a escala regional	109
6.2.4.2. Validación del modelo a escala local	111
6.3. MODELO DE GEOPROCESAMIENTO PARA LA PREDICCIÓN DE LA VOCACIÓN DE USO DE LA TIERRA	117
6.3.1. Componentes de la Vocación de Uso.....	117
6.3.1.1. Capacidad de Uso de la Tierra (PCU)	117
6.3.1.2. Requerimientos agroecológicos de los cultivos (RC).....	117
6.3.1.3. Planes agrícolas nacionales, regionales y locales (PA)	117
6.3.1.4. Disponibilidad de recursos hídricos (Índice Hídrico).....	119

6.3.1.5. Disponibilidad de infraestructura (Índice de Infraestructura).....	126
6.3.1.6. Disponibilidad de servicios de apoyo a la producción (Índice de Servicios)	126
6.3.2. Integración de los componentes de la Vocación de Uso	128
6.4. MODELO DE GEOPROCESAMIENTO PARA LA APLICACIÓN DEL IMPUESTO TERRITORIAL.....	132
6.4.1. Método de evaluación de la base imponible	132
6.4.2. Escenarios de tributación	139
6.5. SÍNTESIS	140
7. RESULTADOS Y CONCLUSIONES	142
7.1. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	143
7.1.1. Modelo de geoprocesamiento para la predicción de la Capacidad de Uso de la Tierra.....	143
7.1.1.1. Fuentes del DEM	143
7.1.1.2. Variables geomorfológicas	144
7.1.1.3. Ajuste y validación del modelo a escala regional.....	146
7.1.1.4. Ajuste y validación del modelo a escala local.....	147
7.1.2. Modelo de geoprocesamiento para la predicción de la Vocación de Uso de la Tierra.....	149
7.1.2.1. Disponibilidad de Recursos Hídricos	149
7.1.2.2. Disponibilidad de Infraestructura.....	151
7.1.2.3. Disponibilidad de Insumos y Servicios	152
7.1.2.4. Índice integrado de Agrosuporte	152
7.1.3. Modelo de geoprocesamiento para la Tributación Territorial	153
7.2. CONCLUSIONES	154
7.3. APORTACIONES ORIGINALES	157
7.4. NUEVAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	159
BIBLIOGRAFÍA	161
APÉNDICES	176

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1. Modelo legislativo para la definición de la Vocación de Uso de la Tierra.	19
Figura 2-2. Modelo teórico de la pedogénesis.....	22
Figura 2-3. Clases del Sistema de Clasificación por Capacidad de Uso de la Tierra.	25
Figura 2-4. Modelo teórico para la Evaluación de la Capacidad de Uso de las Tierras.	27
Figura 2-5. Áreas mínimas de planificación y de delineación de unidades cartográficas de suelo	29
Figura 3-1. Expresiones matemáticas para el cálculo de la concordancia	44
Figura 4-1. Ubicación del área de estudio y sus zonas eco-geográficas, Estado Aragua- Venezuela.	49
Figura 4-2. Ubicación Áreas de Referencia para el muestreo de la variable dependiente.....	54
Figura 4-3. Relieve en perspectiva del área de referencia Cuenca Alta del Río El Limón, Estado Aragua (Serranía del Litoral).	55
Figura 4-4. Capacidad de Uso de la Tierra en la Cuenca Alta del Río El Limón, Estado Aragua	55
Figura 4-5. Relieve en perspectiva del área de referencia Cuenca del Río Aragua, Estado Aragua (Serranía del Litoral y Depresión del lago de Valencia).....	57
Figura 4-6. Capacidad de Uso de la Tierra en la Cuenca del Río Aragua, Estado Aragua....	58
Figura 4-7. Relieve en perspectiva del área de referencia Cuenca Alta del Río Guárico, Estado Aragua (Serranía del Interior).	59
Figura 4-8. Capacidad de Uso de la Tierra en la Cuenca Alta del Río Guárico, Estado Aragua	59
Figura 4-9. Relieve en perspectiva del área de referencia Sector Tocarón, Estado Aragua (Depresión del Lago de Valencia).	60
Figura 4-10. Capacidad de Uso de la Tierra en el sector Tocarón, Estado Aragua	61
Figura 4-11. Relieve en perspectiva del área de referencia Sector La Peñita, Estado Aragua (Llanos Centrales).....	62
Figura 4-12. Capacidad de Uso de la Tierra en el sector La Peñita, Estado Aragua	62
Figura 5- 1. Calculo del Índice de Convergencia	69
Figura 5- 2. Participación de los factores formadores Clima y Organismos en el proceso pedogenético de estructuración del suelo	82
Figura 6-1. Modelo de geoprocesamiento propuesto para la predicción de la Capacidad de Uso de la Tierra.	90

Figura 6-2. DEM provenientes de los sensores SRTM y ASTER, en comparación con un DTM derivado de levantamientos topográficos.....	93
Figura 6-3. Histograma de frecuencia de errores entre DEM derivados de satélites y DTM de mapas topográficos.....	94
Figura 6-4. Distribución espacial de las diferencias altimétricas entre los DEM satelitales y el DTM topográfico.	95
Figura 6-5. Índice de Llanura de Fondos de Valle.	98
Figura 6-6. Índice Topográfico de Humedad.	100
Figura 6-7. Red de estaciones climáticas del área de estudio y estados vecinos.	102
Figura 6-8. Semivariograma para la precipitación media anual de la red de estaciones climáticas del Estado Aragua y estados vecinos.....	103
Figura 6-9. Excedente anual de humedad del suelo.	104
Figura 6-10. Índice Normalizado de Diferencia de Vegetación.....	105
Figura 6-11. Mapas de Capacidad de Uso de la Tierra del área de estudio (levantamiento convencional y predicción del modelo).	110
Figura 6-12. Predicción de la Capacidad de Uso de la Tierra en el Estado Aragua.	112
Figura 6-13. Capacidad de Uso de la Tierra del sector La Peña y Predicción del modelo.....	116
Figura 6-14. Modelo de geoprocetamiento propuesto para la determinación de la Vocación de Uso de la Tierra.....	118
Figura 6-15. Densidad de Cuerpos de Agua (DCA) en un radio de búsqueda de 5.7 km. ..	120
Figura 6-16. Procedimiento de cálculo para obtener la Densidad de Cuerpos de Agua.....	122
Figura 6-17. Índice Hídrico para la estimación de la disponibilidad potencial de recursos hídricos.	123
Figura 6-18. Índice de Infraestructura para la estimación de la disponibilidad potencial de infraestructura de apoyo a la producción agrícola.	127
Figura 6-19. Relación entre el número de habitantes y la superficie de las Parroquias del Estado Aragua.....	128
Figura 6-20. Índice de Servicios para la estimación de la disponibilidad potencial de insumos y servicios de apoyo a la producción agrícola.....	129
Figura 6-21. Índice de Agrosoprote, integrado por el Índice Hídrico, el Índice de Infraestructura y el Índice de Servicios.....	130
Figura 6-22. Superposición y escalado de los índices componentes de la Vocación de Uso.	132
Figura 6-23. Modelo legislativo para la determinación del Impuesto Predial en Venezuela. .	133

Figura 6-24. Parcelas del Sector Tocarón, seleccionadas para la evaluación del cálculo del impuesto territorial.	135
Figura 6-25. Parcelas del Sector La Peñita, seleccionadas para la evaluación del cálculo del impuesto territorial.	136
Figura 6-26. Simulación de escenarios de tributación predial en una finca de caña de azúcar (sin Vocación de Uso) y en una finca de maíz (con Vocación de Uso).....	139

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 2-1. Calificación de los factores específicos para la Clasificación por Capacidad de Uso de la Tierra	26
Cuadro 3-1. Formulas para índices de comparación	45
Cuadro 4-1. Características físico-naturales de las zonas ecogeográficas de Estado Aragua	51
Cuadro 4-2. Superficie de las Clases de Capacidad de Uso en los sectores tomados como Áreas de Referencia para el modelo de predicción.	56
Cuadro 5-1. Variables geomorfológicas básicas.....	67
Cuadro 5-2. Variables geomorfológicas específicas de la hidrología.	73
Cuadro 5-3. Variables geomorfológicas específicas de la topo-climatología.	79
Cuadro 6-1. Estadísticas del análisis del error entre DEM satelitales y DTM topográfico. ..	94
Cuadro 6-2. Variables geomorfológicas básicas evaluadas.	97
Cuadro 6-3. Variables geomorfológicas hidrológicas evaluadas.	99
Cuadro 6-4. Variables geomorfológicas topo-climatológicas evaluadas.	101
Cuadro 6-5. Variables geomorfológicas seleccionadas para el ajuste del modelo de regresión.	106
Cuadro 6-6. Estadísticos de ajuste del modelo de regresión logística definitivo.....	107
Cuadro 6-7. Índices de concordancia derivados de la comparación entre el mapa real de Capacidad de Uso de la Tierra y el mapa predicho por el modelo de regresión.	111
Cuadro 6-8. Ajuste del modelo en el sector Cuenca Alta del Río El Limón (DEM SRTM).	113
Cuadro 6-9. Índices de concordancia (<i>Capacidad de Uso/Predicción</i>) en la Cuenca Alta del Río El Limón (DEM SRTM).	113
Cuadro 6-10. Ajuste del modelo en el sector Cuenca Alta del Río El Limón (DEM topografía).	114
Cuadro 6-11. Índices de concordancia (<i>Capacidad de Uso/Predicción</i>) en la Cuenca Alta del Río El Limón (DEM topografía).....	114
Cuadro 6-12. Ajuste del modelo en el sector Tocarón.....	114
Cuadro 6-13. Índices de concordancia (<i>Capacidad de Uso/Predicción</i>) en el sector Tocarón	115
Cuadro 6-14. Ajuste del modelo en el sector La Peña.	115

Cuadro 6-15. Índices de concordancia (<i>Capacidad de Uso/Predicción</i>) en el sector La Peña.	115
Cuadro 6-16. Caracterización del Índice Hídrico en cuencas hidrográficas del área de estudio.....	125
Cuadro 6-17. Síntesis de datos para la valoración productiva en parcelas seleccionadas del área de estudio.	137
Cuadro 6-18. Síntesis de datos para la valoración tributaria en parcelas seleccionadas del área de estudio.	138

ÍNDICE DE APÉNDICES

APÉNDICE 1. Clases de Capacidad de Uso de la Tierra definidas en el Reglamento Parcial de la Ley de Tierras y Desarrollo Agrario.	177
APÉNDICE 2. Calificación de factores específicos de las clases de Capacidad de Uso de las Áreas de Referencia chequeadas en campo e información catastral recolectada.	179
APÉNDICE 3. Algoritmos geomorfométricos para la determinación de la Pendiente, la Orientación y la Curvatura del terreno.	181
APÉNDICE 4. Algoritmos geomorfométricos para la determinación del Índice de Llanura de Fondos de Valles y de Cimas de Crestas.	185
APÉNDICE 5. Algoritmos geomorfométricos para la determinación de la Radiación Solar Potencial.	188
APÉNDICE 6. Variables geomorfométricas básicas.	196
APÉNDICE 7. Variables geomorfométricas hidrológicas.	202
APÉNDICE 8. Precipitación promedio mensual del área de estudio.	208
APÉNDICE 9. Modelo de regresión lineal múltiple para la evaporación mensual en el Estado Aragua.	210
APÉNDICE 10. Déficits promedios mensuales de humedad del suelo.	211
APÉNDICE 11. Excedentes promedios mensuales de humedad del suelo.	213
APÉNDICE 12. Almacenamientos promedios mensuales de humedad del suelo.	215
APÉNDICE 13. Variables geomorfométricas topo-climatológicas.	217
APÉNDICE 14. Matriz de correlación de las variables geomorfométricas evaluadas.	221
APÉNDICE 15. Coeficientes del modelo logístico para cada clase de Capacidad de Uso de la Tierra por variable geomorfométrica.	224
APÉNDICE 16. Influencia de cada variable geomorfométrica en cada clase de Capacidad de Uso de la Tierra (Razón de Odds).	226
APÉNDICE 17. Error de clasificación (Tabla de Contingencia).	228
APÉNDICE 18. Escenarios de simulación de valoración tributaria en fincas del estado Aragua.	229

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1. INTRODUCCIÓN

La determinación de la capacidad productiva de las tierras agrícolas es un requisito para la cuantificación de la base imponible del impuesto predial rural venezolano. Este impuesto grava los predios rústicos en función del uso dado por el sujeto de tributación, y tiene una finalidad más enfocada al ordenamiento del uso de las tierras que de recaudación fiscal. El conocimiento de la capacidad productiva de las tierras también es de utilidad en la planificación de su aprovechamiento, toda vez que la definición de las capacidades productivas de las distintas unidades de tierras, en los distintos ambientes agroecológicos, determina los umbrales para el uso sustentable del recurso.

La valoración tributaria de las tierras rústicas está basada en la valoración productiva de los predios y ésta a su vez se determina por la *Vocación de Uso de la Tierra*. La Ley de Tierras y Desarrollo Agrario (LTDA) (ANRBV, 2005) define la *Vocación de Uso* como la interacción de factores físicos (*Capacidad de Uso de la Tierra, Requerimientos Agroecológicos de los Cultivos y Disponibilidad de Recursos Hídricos*) con factores socio-económicos (*Disponibilidad de Insumos, Servicios e Infraestructura*) y políticos (*Planes Agrícolas*). Todos estos componentes requieren una base de información a un nivel de detalle apropiado para la implementación del procedimiento de tributación.

La información básica existente para la aplicación del impuesto predial es limitada, tanto en cobertura como en escala. La restricción principal radica en la disponibilidad de información edafológica. En Venezuela los estudios de suelo a escala 1:250.000 (Estudios a Gran Visión) cubren cerca del 95% de la superficie nacional, a escala 1:100.000 (Estudios de Reconocimiento) se han cubierto unas 8.8 millones de ha (10% del territorio) y a escala 1:50.000 o mayor (Estudios Semi-detallados y Detallados) sólo se cubren unas 2.8 millones de ha (3% del territorio nacional) (Viloria, 2008; Rey, 2007). Estas cifras reflejan la escasa disponibilidad de la información requerida para realizar una adecuada planificación y gestión del sector agrícola nacional o para implementar mecanismos de gestión de tierras como el impuesto predial. Buena parte de los estudios disponibles se derivan del desarrollo de las grandes obras hidráulicas de riego y saneamiento de la década de los 70 (ACFMN, 1993) y en su mayor parte datan del período 1960-1990, variando en niveles de calidad (Viloria, 2008). Por otra parte las series de datos climáticos del país son en general de corta duración y provienen de redes meteorológicas de baja densidad, con abundantes datos faltantes y limitada disponibilidad (Machado et al., 2007; Pérez et al., 2007; Ablan et al., 2008).

Esta situación de retraso en el levantamiento de la cobertura edafológica detallada y semidetallada es común en casi toda Latinoamérica, que cuenta con inventarios globales sólo a escalas de reconocimiento. Ningún país de Latinoamérica supera el 5% de cobertura a escala 1:25.000, salvo algunas islas del Caribe, mientras que a escalas intermedias (1:100.000 a 1:50.000) la cobertura varía entre 0 y 20%. El resto de países en desarrollo tienen una situación similar o peor. En Europa, países como España, Francia y Suecia tienen cubierto menos del 20% de su territorio a escala de 1:50.000 o mayor (Hartemink, 2008).

Los levantamientos de suelo requieren un arduo trabajo que implica fases de planificación, muestreo en campo, análisis de laboratorio y procesamiento de datos, por lo que son lentos y costosos, lo que explica en parte la escasez de mapas detallados y actualizados. Por otra parte la emergencia de nuevas áreas de interés por la información de suelos, principalmente vinculada con la evaluación ambiental, está impulsando el desarrollo de nuevos métodos de estudio que mejoren o reemplacen los convencionales análisis de laboratorio (Lagacherie, 2008; Minasny et al., 2008). Entre las nuevas metodologías que se están desarrollando destacan, del lado del hardware, los sensores remotos, basados en satélite (Hyperion, ASTER, Landsat, SPOT, AVHRR, MODIS) o aerotrasportados (HyMap, AVIRIS, radiómetros de rayos gamma, fotografías aéreas) y los sensores próximos (medidores basados en la inducción electromagnética, espectrómetros de rayos gamma). Del lado del software se están desarrollando métodos de muestreo mejorados (que consideran la estratificación espacial de todos los factores formadores del suelo) y métodos de predicción mejorada (como el estimador de máxima verosimilitud, aplicado en la presente investigación).

Ante la falta de información espacialmente distribuida, relacionada con la capacidad productiva de los suelos, se pueden hallar relaciones indirectas de productividad de los cultivos o de la cubierta vegetal, apoyándose en imágenes de sensores remotos. Para ello se han desarrollado procedimientos en base a indicadores como el Índice Normalizado de Vegetación (NDVI), la Fracción Absorbida de Radiación Fotosintéticamente Activa (fAPAR) y el Índice de Área Foliar (LAI) (Olsson y Pilesjö, 2002). Entre otros aspectos se ha estudiado la correlación entre el NDVI y estadísticas regionales de productividad de praderas (Smit et al., 2008), productividad de cultivos anuales en base al NDVI, LAI y modelos agronómicos de simulación (Doraiswamy et al., 2005; Moriondo et al., 2007) o la productividad de bosques a partir del NDVI y datos climáticos (Berberoglu et al., 2007).

Algunas propiedades del suelo, claves en la determinación de la productividad de las tierras, pueden ser evaluadas directamente con imágenes de sensores remotos. Esto a pesar de que usualmente el suelo se encuentra cubierto por la vegetación y que sólo en algunos casos su superficie es visible (Rossiter, 2005). Las imágenes multispectrales del sensor Landsat pueden representar covariables ambientales de vegetación, material parental y suelos y, conjuntamente con Modelos Digitales de Elevación (DEM), utilizarse para modelar la distribución del suelo en el paisaje (Boettinger et al., 2008).

Cuando existe información edafológica apropiada se pueden aplicar métodos propuestos en diferentes países para la evaluación de las tierras, tales como la Evaluación de Tierras por *Capacidad de Uso* (Klingebiel y Montgomery, 1961; Comerma y Arias, 1971), Clasificación de Tierras con Fines de Riego (USDI, 1971), Clasificación de la Capacidad de Fertilidad del Suelo (Sánchez et al., 1982), Evaluación de Tierras para Propósitos Específicos, de acuerdo al esquema y directrices de la FAO (FAO, 1991; 1990; 1985; 1983; 1976).

Un área de investigación que se viene desarrollando desde hace unos 15 años, útil para la estimación de las propiedades de los suelos en áreas con escasa información, es la cartografía predictiva de los suelos (Dobos y Hengl, 2009; Lagacherie, 2008; Scull et al., 2003) y de otras variables ambientales relacionadas con la pedogénesis (Hengl y MacMillan, 2009; Jelaska, 2009; Evans et al., 2009; MacMillan et al., 2009; Peckham, 2009; Emeis y Knoche, 2009). Algunos enfoques en esta área se orientan a la predicción de las propiedades de los suelos apoyándose en Modelos Digitales del Terreno (DTM) y modelado estadístico (Dobos y Hengl, 2009; Giasson et al., 2008; Debella-Gilo et al., 2007; Drăgut y Blaschke, 2006; Schneider y Robbins, 2001; Lagacherie y Voltz, 2000; McKenzie y Ryan, 1999) o la clasificación automatizada de unidades de suelos, a partir del DTM y técnicas de clasificación de imágenes, aplicada sobre parámetros del DTM (Valladares y Hott, 2008; Penizek y Boruvka, 2008; Mendonça-Santos et al., 2008; Hengl y Rossiter, 2003; Bathgate y Duran, 2003; Ventura e Irvin, 2000). La clasificación automatizada puede perseguir la definición de unidades de paisajes de suelo, que después se clasificarán en unidades de suelo, haciendo el mapeo de suelos más rápido y menos subjetivo (Carvalho et al., 2008).

Para la elaboración de mapas de suelo, bajo el enfoque de cartografía predictiva de suelos, se han utilizado capas derivadas del DTM tales como el gradiente de la pendiente, longitud de la pendiente, curvatura horizontal y vertical, flujo acumulado, densidad de líneas de flujo, distancia a depresiones y cumbres (Bathgate y Duran, 2003) o profundidad de aguas

subterráneas, pendiente, curvatura, cuenca visual, flujo acumulado, índice de humedad, índice de transporte de sedimentos y distancia al cauce más cercano (Hengl y Rossiter, 2003).

Los datos para la elaboración del DTM pueden provenir de fuentes tan diversas como topografía de campo convencional o con GPS, digitalización de mapas topográficos existentes o de imágenes de sensores remotos espaciales o aerotransportados. Particularmente interesante para áreas con escasa información topográfica, son las imágenes de Radar (bandas C y X) obtenidas por el Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), dada su libre disponibilidad en Internet vía FTP. Estas imágenes fueron capturadas entre el 11 y el 20 de febrero del 2000 por el transbordador espacial Endeavour. En esta misión se generaron dos conjuntos de datos, uno, sólo disponible para el territorio de los EEUU, con una resolución aproximada de 30 m (1 segundo de arco) y una precisión de 16 m en vertical y 6 m en horizontal, y el otro, de libre disponibilidad, con una resolución aproximada de 90 m (3 segundos de arco) y una precisión de 16 m en vertical y 20 m en horizontal (Nelson, et al., 2009). Los datos del Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) con resolución de 3 segundos de arco, pueden ser útiles como fuente de información topográfica cuando sólo se dispone de cartografía a escala menor a 1:50.000 (Jarvis et al., 2004) y se pueden emplear para elaborar bases de datos de suelo a escala 1:250.000 con adecuado pre-procesamiento (Vrščaj et al., 2007).

La mayor parte de la investigación en cartografía predictiva de suelos se ha hecho a escalas muy grandes, con el objetivo de proporcionar información de suelos precisa y detallada para modelos agrícolas y ecológicos, por lo que existe una deficiencia en la producción de mapas regionales a escala más pequeña (Scull et al., 2003). Así mismo, el enfoque se ha centrado en el factor relieve, a partir de los parámetros derivados del DTM (mapas pedométricos), minimizando el efecto neto de los otros cuatro factores formadores del suelo, según el modelo formulado por Hans Jenny en la década de los 40 (clima, biota, material parental y tiempo) (Scull et al., 2003).

La cartografía predictiva de suelos podría ser utilizada en las áreas con escasa información edafológica de Venezuela para generar la información requerida en los procedimientos de valoración del impuesto territorial, que se basan en la productividad de los suelos. Para ello se deben generar datos a escalas detalladas o semi-detalladas, para estudios locales, o a escalas más generales, para estudios regionales, apoyándose en la información ambiental disponible. La predicción a escalas intermedias (1:100.000-1:250.000) puede ser

de utilidad con fines de planificación regional y para estimación de la recaudación tributaria con fines de gestión de políticas agrícolas.

1.2. OBJETIVOS

Para la resolución del problema de investigación planteado en la introducción, en esta tesis se persiguen los siguientes objetivos:

1.2.1. General

Desarrollar una metodología para la cuantificación de la productividad y la valoración tributaria de las tierras agrícolas de Venezuela, mediante el diseño y validación de un modelo de geoprocusamiento adaptado a áreas con limitada disponibilidad de información.

1.2.2. Específicos

- a) Identificar las principales metodologías existentes para la descripción geomorfométrica del relieve terrestre, con la finalidad de determinar su vinculación con los procesos pedogenéticos del suelo relacionados con la *Capacidad de Uso de la Tierra*.
- b) Diseñar un geoprocusamiento para la evaluación de la *Capacidad de Uso* de las tierras agrícolas en áreas con escasa información edafológica.
- c) Diseñar un geoprocusamiento para la evaluación de la *Vocación de Uso* de las tierras agrícolas en áreas con escasa información ambiental y socio-económica.
- d) Diseñar un geoprocusamiento para la *Tributación Territorial* de tierras agrícolas, con base en el modelo legislativo venezolano, sustentado en el balance entre la *Vocación de Uso* de las tierras y su *Uso Actual*.
- e) Modelar los geoprocusamientos de valoración productiva y tributaria diseñados y aplicarlos en la simulación de escenarios de producción agrícola y tributación territorial con las herramientas de un SIG.

1.3. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN

Para alcanzar los objetivos formulados y desarrollar un método para abordar el problema se plantean las siguientes hipótesis:

- a) Se pueden utilizar técnicas de cartografía predictiva para generar variables interpretativas de suelos (un nivel superior de abstracción, derivado de las características y cualidades de los suelos) tales como la Clasificación por *Capacidad de Uso* o la Clasificación con Fines de Ingeniería.
- b) La predicción de la *Capacidad de Uso de la Tierra* se puede realizar a escala regional, partiendo de estudios locales existentes y variables predictoras de naturaleza topográfica, derivadas de imágenes de sensores remotos.
- c) Las variables predictoras geomorfométricas básicas, derivadas del DEM, y que conforman el factor Relieve en el modelo pedogenético del suelo, tienen una mejor capacidad predictiva si se complementan con otros factores formadores del suelo, como el clima y la vegetación, que pueden ser derivados de sensores remotos.
- d) En la definición de la *Vocación de Uso* de las tierras, los elementos de naturaleza socio-económica, como la infraestructura de agrosuporte, los servicios y la disponibilidad de insumos y mano de obra, pueden ser simulados partiendo de la red de infraestructura disponible en la cartografía básica nacional.
- e) La disponibilidad de recursos hídricos, como componente en la definición de la *Vocación de Uso*, puede ser simulada a partir de la red de drenaje derivada del DEM y del balance hídrico regional.
- f) El impuesto territorial que grava la ociosidad en el uso de las tierras agrícolas de Venezuela, puede ser estimado en áreas con limitada disponibilidad de información, a partir de modelos de predicción de la *Capacidad de Uso* y *Vocación de Uso* de las tierras, basados en información libremente obtenible de sensores remotos.

1.4. METODOLOGÍA EMPLEADA Y MATERIALES DISPONIBLES

1.4.1. Metodología

El objetivo general y los objetivos específicos planteados son abordados mediante la siguiente secuencia metodológica:

1.4.1.1. Revisión bibliográfica

Para fundamentar el cumplimiento del objetivo general formulado y la totalidad de objetivos específicos constituyentes, en particular el objetivo (a), se han revisado los siguientes aspectos:

- a. *Impuesto predial en el marco legislativo venezolano.*
- b. *Capacidad y Vocación de uso de las tierras agrícolas.*
- c. *Modelo estadístico de predicción.*
- d. *Caracterización del área de estudio.*
- e. *Variables geomorfológicas de predicción.*

1.4.1.2. Geoproceso para la predicción de la Capacidad de Uso de la Tierra

Para el cumplimiento del objetivo específico (b) se desarrolla un modelo de geoprocesamiento para la predicción de la *Capacidad de Uso* de las tierras agrícolas en áreas con escasa información edafológica, con base en las siguientes actividades:

- a. Selección de áreas de muestreo para la definición de la variable dependiente *Capacidad de Uso de la Tierra*. Las áreas seleccionadas son representativas de los distintos ambientes ecológicos que caracterizan la región de estudio y cuentan con estudios de suelo a escalas 1:25.000 y 1:100.000.
- b. Obtención de un DEM a partir de imágenes de sensores remotos, como fuente básica para la generación de las variables independientes del modelo. Se evalúa el DEM derivado de imágenes de radar de la Misión Topográfica Shuttle (SRTM) y el DEM derivado de imágenes estereoscópicas del satélite ASTER. Esta fase implica la selección y pre-procesamiento del DEM.
- c. Generación de variables geomorfológicas a partir del DEM seleccionado y de la información ambiental disponible.
- d. Ajuste de un modelo estadístico de regresión, utilizando la *Capacidad de Uso* como variable dependiente categórica y variables geomorfológicas derivadas del DEM como variables independientes. El modelo se debe ajustar sobre una región de carácter administrativo como un Municipio o un Estado, para permitir su aplicación en los procedimientos estándares de gestión tributaria.

- e. Validación del modelo mediante análisis del error de clasificación en las áreas de muestreo seleccionadas.

1.4.1.3. Geoproceso para la predicción de la Vocación de Uso de la Tierra

Para el cumplimiento del objetivo específico (c) se desarrolla un modelo de geoprocesamiento que permite la predicción de la *Vocación de Uso de la Tierra*, con base en índices formulados para su aplicación en áreas con limitada disponibilidad de información espacial físico- natural y socio-económica. Los indicadores que se consideran, con base en la definición de *Vocación de Uso de la Tierra* de la legislación venezolana (ANRBV, 2005; RBV, 2005), son:

- a. Disponibilidad de recursos hídricos.
- b. Disponibilidad de infraestructura de agrosuporte.
- c. Disponibilidad de insumos y servicios de apoyo a la producción.

1.4.1.4. Geoproceso para el cálculo de la Tributación Territorial

Para el cumplimiento de los objetivos específicos (d) y (e) se desarrolla un modelo de geoprocesamiento para la aplicación del modelo legislativo venezolano de impuesto territorial, basado en la productividad y la producción actual de las tierras agrícolas, estimadas con los geoprocesos desarrollados para la predicción de la *Capacidad y Vocación de Uso* de las tierras agrícolas. Este modelo se evalúa mediante su aplicación en las áreas de muestreo seleccionadas.

1.4.2. Materiales

Se emplean los siguientes recursos para el desarrollo de la investigación:

- a) DEM derivado de las imágenes de radar de la Misión Topográfica del Transbordador Endeavour (Shuttle Radar Topography Mission-SRTM) de febrero del 2000. Se utilizan 4 imágenes con un tamaño de 1°x1° cada una, que cubren desde las coordenadas 9° a 11° de Lat N y 66° a 68° de Long O. Estas imágenes tienen una resolución de 3" de arco (90 m), una exactitud de 20 m en horizontal y de 16 m en vertical y fueron obtenidas del U. S. Geological Survey (USGS, 2009) (<http://dds.cr.usgs.gov/srtm/>).
- b) DEM derivado de las imágenes estereoscópicas del satélite ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) obtenidas en el período 2000-2008 y liberadas a partir julio de 2009. Se utilizan 4 imágenes del mismo tamaño

y cobertura que las imágenes SRTM. Estas imágenes tienen una resolución de 1" de arco (30 m), una exactitud estimada de 30 m en horizontal y 20 m en vertical y fueron obtenidas del Earth Remote Sensing Data Analysis Center (ERSDAC, 2009) (<http://www.ersdac.or.jp/GDEM/E/index.html>).

- c) Ortofotos digitales del Estado Aragua de fecha 1995 y 1998. Se emplean 91 ortofotos con un tamaño de 7.5'x 5' de arco y 2.5 m de resolución (MAC-ONCTA, 1998; MARNR-SAGECAN, 1995).
- d) Cartas topográficas en papel a escalas 1:25.000 (93 hojas de 7.5'x 5' de arco) y 1:100.000 (11 hojas de 30'x 20' de arco) (MOP-MAC-MARNR, 1970-1998).
- e) Imágenes multiespectrales del sensor Landsat ETM+ de fechas 18/03/2000 y 14/03/2001 (University of Maryland, 2008) (<http://glcfapp.umiacs.umd.edu:8080/esdi/index.jsp>).
- f) Mapas de Capacidad de Uso de la Tierra de los sectores de referencia, disponibles a escala 1:100.000 y 1:25.000 (CEAEA, 2005; SISDELAV, 2005; SIACARG, 2005; SIACRA, 2005).
- g) Datos promedios mensuales de las series históricas de precipitación, evaporación y temperatura disponibles para la red de estaciones climáticas del Estado Aragua y Estados vecinos (MINAMB, 2008).
- h) Software:

Se emplean los siguientes programas informáticos para el desarrollo de la investigación:

- **gvSIG 1.1.2** (gva, 2009) (<http://www.gvsig.gva.es/inicio-gvsig/>). Este software se utiliza para la visualización global de toda la cartografía disponible del área en sus formatos y sistemas de referencia originales.
- **SEXTANTE2.0** (Olaya, 2006) (<http://forge.osor.eu/plugins/wiki/index.php?id=13&type=g>). Se utiliza para derivar, a partir del DEM, las principales variables geomorfométricas consideradas en el modelo.
- **SAGA 2.0.4** (Cimmery, 2007) (<http://www.saga-gis.org/en/index.html>). Se utiliza para derivar, a partir del DEM, las variables geomorfométricas de más reciente implementación.

- **IDRISI Andes** (Eastman, 2006) (<http://www.clarklabs.org/>). Se utiliza para ajustar y validar el modelo de regresión de la *Capacidad de Uso de la Tierra*.
- **ArcGIS 9.3** (<http://www.esri.com/software/arcgis/>). Se emplea para digitalizar las capas vectoriales de la red vial, red de centros poblados y red hidrográfica, así como para derivar modelos de elevación digital de estas variables a partir de estadística focal, con fines de desarrollar el modelo de *Vocación de Uso de la Tierra*.

1.5. ESTRUCTURA DE LA TESIS

Esta tesis consta de 7 capítulos y 18 apéndices. El presente capítulo introductorio, plantea el origen del problema de investigación y los objetivos, hipótesis, métodos y materiales propuestos para su resolución.

En el Capítulo 2 se estudia el objeto central de investigación: el impuesto predial venezolano. Se describe el marco legislativo en el que se circunscribe el impuesto, así como su estructura general y componentes de valoración. El elemento fundamental del impuesto es la *Vocación de Uso de la Tierra*, concepto que es definido en este capítulo y que se conforma de elementos socio-económicos, políticos y físico-naturales, siendo el principal de estos últimos la *Capacidad de Uso de la Tierra*. Esta última es descrita en el capítulo, partiendo del modelo pedogenético del suelo, con la finalidad de relacionar los factores formadores del suelo con las cualidades y características que definen la *Capacidad de Uso*. Finalmente se hace referencia a las escalas utilizadas en la cartografía de suelos para definir el ámbito y alcance de este estudio, orientado a la planificación regional y a la estimación de la recaudación tributaria con fines de gestión de políticas agrícolas.

En el Capítulo 3 se describe matemáticamente el modelo de regresión logística multinomial, seleccionado para modelar la *Capacidad de Uso de la Tierra* a partir de variables geomorfométricas derivadas de un DEM, procedimiento que se propone para su aplicación en áreas con limitada disponibilidad de información. También se describen en el capítulo las técnicas de ajuste del modelo y las principales metodologías para su validación.

En el Capítulo 4 se caracteriza la variable dependiente del modelo de regresión, conformada por los mapas de *Capacidad de Uso* existentes en sectores de referencia dentro del área de estudio. Se describe el área de estudio y cada una de las Áreas de Referencia seleccionadas dentro de ésta, y que se emplean para el muestreo y ajuste del modelo de regresión.

El Capítulo 5 corresponde a las variables independientes del modelo de regresión. Aquí se presenta la base teórica de los principales algoritmos utilizados para generar las variables a partir del análisis numérico del DEM. La fundamentación teórica permite relacionar las variables con los procesos pedogenéticos de formación del suelo y así facilita la selección de las variables conceptualmente adecuadas para el ajuste de modelo. Se presentan tres grupos de variables geomorfométricas: variables básicas, variables hidrológicas y variables topoclimatológicas.

En el Capítulo 6 se implementa el desarrollo del proceso metodológico descrito en el Capítulo 1, con base en los fundamentos teóricos de los capítulos 2 al 5. Se desarrollan y aplican los modelos de geoprocesamiento para la determinación de la *Capacidad de Uso de la Tierra*, para la determinación de la *Vocación de Uso de la Tierra* y para la *Valoración Tributaria de Tierras* de acuerdo a la legislación venezolana. El desarrollo de la metodología permite valorar escenarios de tributación territorial en fincas seleccionadas del área de estudio.

En el Capítulo 7 se analizan los resultados obtenidos con el desarrollo metodológico implementado en el Capítulo 6, se presentan las conclusiones de la investigación, así como las aportaciones y líneas de investigación que aún quedan por concluir o que se vislumbran a la luz del trabajo realizado.

Finalmente se presentan las referencias bibliográficas utilizadas y los apéndices con datos básicos que complementan los aspectos y procedimientos de cálculo desarrollados en los distintos capítulos.

CAPÍTULO 2

IMPUESTO TERRITORIAL Y VALORACIÓN PRODUCTIVA DE LAS TIERRAS AGRÍCOLAS EN VENEZUELA

2.1. INTRODUCCIÓN

En Venezuela la formulación e implementación de planes de desarrollo y gestión de políticas públicas generalmente se ve dificultada por la limitada disponibilidad de información básica. No se han completado los levantamientos de información físico-natural a escalas altas y medias, como es el caso de los estudios edafológicos, y la información de carácter socio-económica es difícilmente obtenible ante la carencia de una adecuada Infraestructura de Datos Espaciales. El impuesto predial es un mecanismo de gestión propuesto para enfrentar el problema de infrautilización de las tierras agrícolas y la inseguridad alimentaria del país, el cual se ha visto impedido en su implementación por falta de la información mínima para su estimación, a pesar de circunscribirse a un área de alta sensibilidad y conflictividad social.

En este capítulo se presenta el modelo legislativo venezolano de impuesto territorial y sus dos componentes básicos de valoración: la *Vocación* y la *Capacidad de Uso de la Tierra*. Para determinar la *Vocación de Uso* se requiere información sobre la *Capacidad de Uso* y algunas variables socio-económicas. Para determinar la *Capacidad de Uso* se requiere información sobre algunas características y cualidades de los suelos. La información requerida es de disponibilidad muy limitada y de allí que se proponen modelos de geoprocusamiento para su obtención, a partir de otra información existente. Por esta razón en el capítulo también se describe el modelo pedogenético del suelo, elemento que permite formular las bases conceptuales de obtención de las variables a incorporar en dichos modelos de geoprocusamiento.

2.2. MARCO LEGISLATIVO VENEZOLANO

En la casi totalidad de los países de América existe un impuesto territorial o predial que grava los bienes urbanos o rurales y que tiene como base imponible el valor catastral de cada bien (Gutiérrez, 2008; Cavada, 2007; Assunção y Moreira, 2005; Sjoquist, 2004, Iregui et al., 2003). Países como Argentina, Brasil, Jamaica y México incluyen una parte alícuota de recarga para tierras ociosas en el ámbito urbano y rural.

En América Latina, de acuerdo a Assunção y Moreira (2005), además del uso agrícola, la tierra es empleada para propósitos como: cobertura contra la inflación, como activo de reserva para liquidación en etapas de riesgo, como garantía para obtención de créditos, para evasión de impuestos (impuestos sobre la renta) y hasta para lavar fondos ilícitos. En

Venezuela, incluso algunos propietarios u ocupantes reservan la tierra agrícola para fines recreativos y de ostentación. Existe además un marcado subdesarrollo del mercado de rentas en América Latina, con sólo entre 5 a 10% de la tierra bajo régimen contractual, ocasionado entre otras cosas por el temor de los propietarios a perder las tierras (Assunção y Moreira, 2005). En Venezuela esta cifra está alrededor de 2.5% (Delahaye, 2006), incluyendo las figuras jurídicas de arrendamiento, concesión y medianería. Todos estos elementos conducen a los agricultores de baja productividad a mantener grandes extensiones de tierras ociosas, fomentando el latifundio y la macro-dependencia alimentaria (Assunção y Moreira, 2005).

En los países que imponen el tributo predial, el valor catastral del bien rural se establece de acuerdo a la valoración establecida en los mecanismos de los distintos instrumentos de ley. La valoración de la tierra (su precio en el mercado) refleja de manera *indirecta* el nivel de productividad de este recurso. En el caso venezolano la productividad, a los fines de la aplicación del impuesto, debe ser establecida de manera *directa* (no por el precio de la tierra sino por su rendimiento comparativo, en relación con su *Vocación de Uso*) ya que a partir de este indicador se determina la base imponible del impuesto predial.

La creación del impuesto predial en Venezuela surge con la Ley de Tierras y Desarrollo Agrario (LTDA) (ANRBV, 2005), como un mecanismo para incrementar la producción y productividad del sector agrícola y para enfrentar el latifundio. De allí que en este tributo se pretenda gravar el rendimiento obtenible, a diferencia de la mayor parte de los países en los que se grava el rendimiento obtenido.

De acuerdo a Parra (2006) el impuesto predial venezolano tiene las siguientes características:

- Es un impuesto directo (grava el producto agrícola de la tierra).
- Grava los predios rústicos (los predios o inmuebles urbanos se rigen por la Ley Orgánica del Poder Público Municipal).
- Tiene una tarifa progresiva (la cuota tributaria es variable y se aplica sobre la totalidad de la base imponible).
- La base imponible se determina mediante métodos mixtos (evaluaciones sobre bases ciertas y evaluaciones presuntivas). La base cierta es el rendimiento agrícola obtenido durante el ejercicio fiscal y la base presunta es el rendimiento obtenible (idóneo) que se esperaría obtener en una *Finca Productiva*.

- Su principal finalidad es extra-fiscal, de ordenamiento económico-social (transformación de las tierras ociosas en unidades económicas productivas), además del fin fiscal recaudatorio.

El fundamento del ordenamiento jurídico del país y la base conceptual del marco de políticas públicas, incluidas las *Políticas de Tierras*, es la Constitución Nacional (ANC, 2000). En su Título III, Capítulo IX, De los Derechos Ambientales, art. 127, 128 y 129, se formulan normas y principios para la protección del ambiente y de los recursos naturales. En el Título IV, Capítulos II, III y IV, De las Competencias del Poder Público Nacional, Estatal y Municipal, respectivamente, en el art. 156, ordinal 14, se definen las potestades tributarias del Poder Publico Nacional, al designarle competencias para la creación y organización de impuestos territoriales o prediales, con recaudación y control por parte de los Municipios; el art. 164, ordinal 5, establece la jurisdicción estatal sobre las tierras baldías de su territorio; el art. 179, ordinal 3, asigna como fuente de ingresos del Poder Municipal el *Impuesto Territorial Rural o Impuesto Predial*; el art. 181 define los ejidos municipales. En el Título VI, Capítulo I, Del Régimen Socioeconómico y de la Función del Estado en la Economía, el art. 305 plantea la promoción de la agricultura sustentable y la seguridad alimentaria; el art. 306 plantea la promoción del desarrollo rural integral, el fomento de la actividad agrícola y el uso óptimo de la tierra; el art. 307 declara al latifundio como contrario al interés nacional y ordena al legislador nacional disponer lo conducente para gravar las tierras ociosas, rescatar y asegurar la propiedad de la tierra para los productores agropecuarios y promover la productividad y competitividad del sector agrícola.

Por su parte la LTDA representa un mayor nivel de concreción política y propone como objeto “...establecer las bases del desarrollo rural integral y sustentable... asegurando la biodiversidad, la seguridad alimentaria y la vigencia efectiva de los derechos de protección ambiental...” (ANRBV, 2005). Para ello esta ley plantea:

- Rescatar, redistribuir e incrementar la productividad de las tierras del Estado que permanecen ociosas o incultas.
- Incrementar la productividad de las tierras privadas que permanecen ociosas o infrautilizadas.
- Implementar el impuesto territorial, a ser aplicado tanto a los particulares poseedores de tierras públicas, como a los propietarios de tierras privadas, cuando mantengan éstas en estado de infrautilización.

- Eliminar el latifundio mediante la aplicación del impuesto territorial o la expropiación de tierras privadas catalogadas como latifundio por esta ley.

De acuerdo a Abarca y Bernabé (2010a) entre el 34 y 66% de la oferta alimenticia de la población venezolana proviene de importaciones, consecuencia de la baja producción de las tierras y de la concentración de la propiedad, como secuelas del latifundio. Según los autores, para el año 2020 en Venezuela se necesitarán unas 55 millones de TM de productos alimenticios y una superficie cosechada que pudiera estar entre 19 y 28 millones de ha, estimadas según un enfoque de autosuficiencia alimentaria, para lo cual la infrautilización de las tierras debería ser afrontada.

En la LTDA se define al latifundio como las tierras ociosas que tienen una extensión mayor al promedio de ocupación de la región en la que se ubican. También constituyen latifundios las tierras que tienen un rendimiento inferior al 80% del valor de rendimiento idóneo preestablecido para el rubro correspondiente en la región, de acuerdo a los planes de seguridad alimentaria formulados por los organismos competentes, así como las tierras cuyos rubros de producción no se adaptan a dichos planes, independientemente de su rendimiento.

Los planes de seguridad alimentaria deben ser formulados por el Estado para satisfacer los requerimientos nutricionales de los venezolanos con base en la capacidad productiva de los suelos (Jaimes et al, 2002). Esta capacidad productiva se define en la legislación por la “vocación de uso de la tierra rural”, según las especificaciones técnicas formuladas en el Reglamento Parcial de la LTDA (RBV, 2005). En la actualidad estos planes están orientados, de acuerdo a las instituciones responsables, a promover la soberanía agroalimentaria, con metas y programas específicos dirigidos a un grupo de rubros prioritarios (bandera) y estratégicos, a ser incentivados y financiados en los ciclos de siembra (MAT, 2007).

La LTDA plantea en su articulado el *Impuesto Predial o Territorial*, como un mecanismo para lograr sus objetivos de incrementar la producción y la productividad agrícola y erradicar el latifundio. La ley establece un procedimiento de estimación de la base imponible, para lo cual se requiere conocer en todo el país la capacidad agrológica de las tierras, así como otras variables agroecológicas que permitan establecer el potencial agroproductivo de las tierras. Este potencial, fundamento de los planes de seguridad alimentaria formulados por el Estado (MAT, 2007), serviría de referencia para evaluar el grado de utilización real de las unidades de producción agrícola o de sus parcelas o lotes productivos, lo que constituye el sustento de valoración de la productividad de la tierra, como

elemento para la estimación de la base imponible del impuesto. La ley establece una tarifa progresiva de impuestos, basada en la subutilización, para fomentar el aprovechamiento óptimo de la tierra.

La *Vocación de Uso de la Tierra* es definida en el reglamento de la LTDA (RBV, 2005) por una combinación de factores de índole física, como el potencial agrológico de las unidades productivas (*Capacidad de Uso* agropecuario), los requerimientos agroecológicos de los cultivos y la disponibilidad de recursos hídricos; de índole socio-económica, como la disponibilidad de insumos, servicios e infraestructura de apoyo a la producción, y de índole política, como los planes agrícolas nacionales y regionales.

En la Figura 2-1 se formula un modelo legislativo para la definición de la *Vocación de Uso de la Tierra*, según las consideraciones de la LTDA (ANRBV, 2005) y las disposiciones formuladas en el artículo 4 del reglamento parcial de la ley (RBV, 2005).

La LTDA (ANRBV, 2005) y su reglamento parcial (RBV, 2005) no definen con precisión un procedimiento técnico para determinar la *Vocación de Uso de la Tierra*, ponderando con claridad sus factores componentes. Se han propuesto algunos procedimientos para la clasificación de las tierras de acuerdo a las estipulaciones de la ley, aunque a nivel de unidades de producción o finca, en zonas de poca extensión superficial y con base en levantamientos edafológicos de campo (Peña et al., 2006) o en zonas con disponibilidad de estudios semi-detallados de suelos (Viloria y Núñez, 2008).

2.3. MODELO PEDOGENÉTICO DEL SUELO

El suelo es un cuerpo físico tridimensional compuesto de materiales orgánicos e inorgánicos cuyas propiedades varían en el espacio y en el tiempo. El estudio integral de este cuerpo implica el conocimiento de sus características y cualidades así como el de su interacción con el ambiente bioclimático en el que se desarrolla. Los factores formadores del suelo tienen una distribución espacial y temporal propia que determina nichos particulares sobre los que evoluciona cada suelo de manera diferenciada. El modelo pedogenético, propuesto por Dokuchaev (1898) y formulado por Jenny (1941), establece que el suelo o sus atributos están en función de los factores o agentes formadores, de acuerdo a la relación:

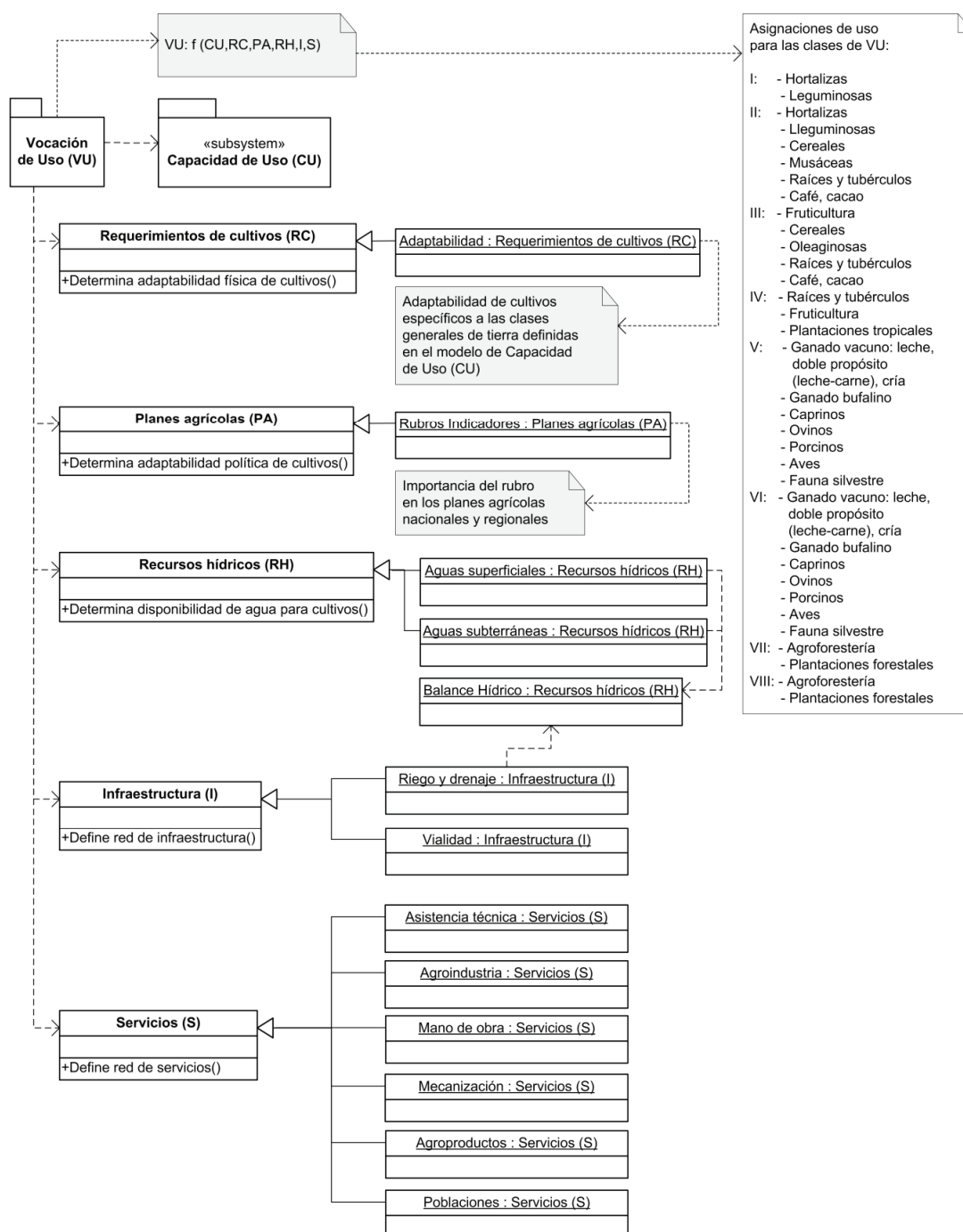


Figura 2-1. Modelo legislativo para la definición de la Vocación de Uso de la Tierra.

Fuente: Adaptado de ANRBV (2005) y RBV (2005).

$$S = f(c, o, r, p, a) \quad (2.1)$$

Donde:

S es el suelo, un suelo o una propiedad del suelo,

f es la función de relación,

c es el clima o propiedad climática (factor activo),

o son los organismos (vegetación, fauna o actividad humana) (factor activo),

r es el relieve o atributos topográficos (factor pasivo),

p es el material parental o litología (factor pasivo),

a es el tiempo, edad o cronología (factor activo).

McBratney et al. (2003) extendieron la ecuación pedogenética de Jenny a la siguiente función:

$$S_{ac} = f(s, c, o, r, p, a, n) \quad (2.2)$$

Donde:

S_{ac} es un atributo o clase de suelo estimados,

s es otra propiedad del suelo,

n es el espacio, posición espacial o relación topológica en un punto.

Los factores formadores están intrínsecamente interrelacionados. Así por ejemplo, cambios en el relieve se traducen en cambios en la climatología y éstos a su vez producen variaciones en la vegetación (Elizalde et al., 2000). El relieve también puede estar condicionado por el material parental o por la cobertura vegetal o incluso por la acción humana. Sin embargo, existen situaciones ambientales en las que algunos factores tienen mayor influencia que el resto en la diferenciación del suelo (en una toposecuencia, por ejemplo, el factor determinante es el relieve), pero su evolución en general responde a la interacción entre todos los factores.

Los estudios de suelo se basan en la evaluación de los factores formadores, sus componentes e interacciones y su manifestación en el espacio. El relieve en particular tiene una fuerte relación con el suelo (Dobos y Hengl, 2009; McBratney et al., 2003). De acuerdo a Dobos y Hengl (2009) los componentes del factor relieve, pendiente y orientación, tienen una relación significativa en la formación del suelo, pero muestran un bajo valor predictivo. Sin embargo, cuando los dos componentes se integran en un modelo, la capacidad de predicción se incrementa significativamente. Según McBratney et al. (2003) las relaciones del suelo con el relieve han sido más fácilmente encontradas pero hay evidencias de relaciones cuantitativas con los otros factores formadores. Se puede concluir por tanto, que la incorporación, a un modelo de predicción, de componentes de cada factor formador, incrementará proporcionalmente su capacidad predictiva.

En la Figura 2-2 se presenta el modelo teórico de la función SCORPAN. Se muestran los siete factores y su función principal en la génesis del suelo. Estos factores se descomponen en elementos constituyentes, la mayor parte de los cuales puede ser representado como una entidad geográfica, adecuada para la evaluación o predicción de propiedades o categorías del suelo.

Los factores formadores determinan los atributos del suelo como consecuencia de su evolución en el tiempo en una determinada posición espacial. La acción de los factores está inexorablemente ligada al tiempo y al espacio. Los atributos del suelo en la época presente no son sólo producto del estado actual de los factores formadores, sino de su estado anterior y de su evolución en el tiempo, por lo que la predicción de propiedades del suelo a partir sólo del estado actual de los factores formadores es una aproximación que se basa en la consideración de su variabilidad espacial más que temporal. Al incluir el estado actual del factor formador clima, por ejemplo, la predicción está considerando la relación de la variabilidad espacial climática con la variabilidad espacial de los atributos actuales del suelo, por lo que no se hacen consideraciones temporales directas, salvo las del propio período del registro climático.

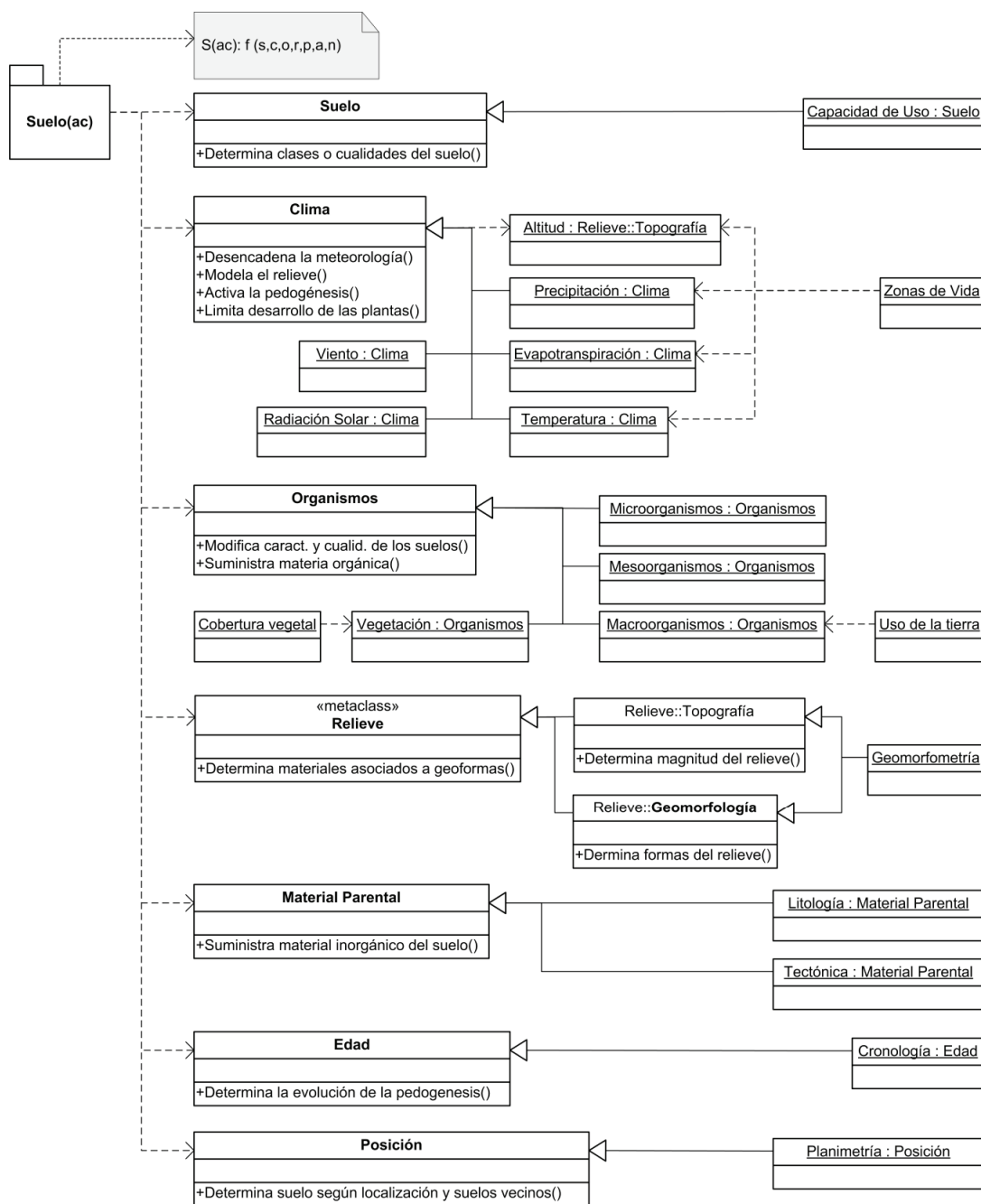


Figura 2-2. Modelo teórico de la pedogénesis. Fuente: Adaptado de McBratney et al. (2003).

2.4. CAPACIDAD DE USO DE LA TIERRA

La variabilidad de las propiedades del suelo puede ser delimitada en umbrales dentro de los cuales determinados usos pueden ser desarrollados satisfactoriamente. Si estos umbrales

incorporan otros atributos que influyan significativamente sobre los usos específicos, tales como la atmósfera, la geología subyacente, el relieve, la hidrología y los organismos, incluyendo al hombre, entonces se pueden identificar áreas ambientales razonablemente estables y agroecológicamente homogéneas, conocidas como Unidades de Tierra.

La determinación de los umbrales y de las potencialidades y limitaciones de los diferentes ambientes que conforman las unidades de tierra, para diferentes usos generales y específicos, es el objetivo de la Evaluación de Tierras.

Se han ideado numerosos métodos para evaluar las tierras y muchos países los han aplicado y han desarrollado variantes adaptadas a sus necesidades. Los sistemas de evaluación más utilizados en Venezuela son:

- Clasificación de Tierras por Capacidad de Uso: desarrollada por Klingebiel y Montgomery (1961), este sistema agrupa las tierras de acuerdo a su capacidad para producir plantas cultivadas comunes, pastos y arboles, por un largo período de tiempo, sin riesgo de deterioro del suelo.
- Clasificación de Tierras con Fines de Riego: se clasifican las tierras con base en características de suelo, topografía y drenaje y en su capacidad de pago o de recuperación de la inversión en las obras de riego (USDI, 1971).
- Clasificación de Suelos por Capacidad de Fertilidad: se agrupan los suelos según sus propiedades físicas y químicas relacionadas con el crecimiento de las plantas y que afectan la dinámica de los fertilizantes y su manejo (Sánchez et al., 1982).
- Zonificación agroecológica de cultivos: se divide la tierra en zonas homogéneas con respecto a los factores físico-naturales más importantes para la producción de cultivos u otras plantas (Rossiter, 1998).
- Interpretación de levantamientos de suelos: se determina la severidad de las limitaciones relativamente permanentes de los suelos, interpretada a partir de la información de levantamientos de suelo detallados o semi-detallados, con relación a usos específicos predefinidos. Frecuentemente se emplea para usos no agrícolas, tales como usos ingenieriles o turísticos (Cortes y Malagón, 1983).

- Clasificación de acuerdo al esquema y directrices de la FAO: en este sistema se determinan las consecuencias positivas y negativas de dos o más tipos de utilización para cada unidad de tierra, tomando en cuenta consideraciones de carácter físico, socio-económico y de conservación del medioambiente (Viloria, 2000). El esquema para la evaluación (FAO, 1976) ha sido completado con las directivas de evaluación de tierras para agricultura de secano (FAO, 1983), para agricultura de regadío (FAO, 1985), para usos forestales (FAO, 1990), para pastoreo extensivo (FAO, 1991) y para relieve accidentado (Siderius, 1986).

La clasificación por *Capacidad de Uso de la Tierra* (Klingebiel y Montgomery, 1961) es el sistema más utilizado a nivel mundial y en Venezuela. La mayor parte del territorio venezolano cuenta con información sobre *Capacidad de Uso* publicada a escala 1:250.000 (Viloria, 2000). Strebin (1989) ha realizado la clasificación por *Capacidad de Uso* de los estados centrales y centro-occidentales del país (Miranda, Aragua, Carabobo, Guárico Occidental, Cojedes, Yaracuy, Portuguesa, Lara y Falcón), publicando un atlas a escala 1:250.000. En el estado Aragua el estudio de clasificación se ha realizado a escala 1:100.000, utilizando el método original y con un sistema de manejo equivalente al utilizado por los agricultores empresariales del centro del país (Strebin, 1974).

El sistema clasifica las tierras en clases, subclases y unidades de capacidad.

Las clases se definen de I a VIII, siendo I, la mejor, en el sentido de la posibilidad de uso más intensivo sin riesgo de deteriorar el suelo, y VIII, la peor. En general las clases I a IV pueden ser utilizadas para cultivos comunes adaptables, pastos y bosques, en condiciones adecuadas de manejo. Las clases V a VII son apropiadas para pastos y arboles de interés económico y la clase VIII se destina a fines de conservación y recreación (Figura 2-3).

INTENSIDAD DE USO →													
A U M E N T A N	D I S M I N U Y E	CLASE DE CAPACIDAD DE USO DE LA TIERRA	V I D A	B O S Q U E	PASTOREO			CULTIVOS					
					L I M I T A D O	M O D E R A D O	I N T E N S I V O	L I M I T A D O	M O D E R A D O	I N T E N S I V O	M U Y I N T E N S I V O		
L A S	L A				B	O	N	M	O	I			
											I	M	E
L I M I T A C I O N E S	A D A P T A B I L I D A D				T	R	S	A	R	T			
											A	A	I
S	D				D	O	V	O	O	S			
											O	O	O
					M	U	Y	I	N	T			
		I											
		II											
		III											
		IV											
		V											
		VI											
		VII											
		VIII											

Figura 2-3. Clases del Sistema de Clasificación por Capacidad de Uso de la Tierra. Fuente: Vilorio (2000).

Las subclases de capacidad agrupan las clases que tienen el mismo tipo de limitación y riesgo de uso. El tipo de limitación puede ser: Erosión (e), Drenaje (d), Suelos (s) y Clima (c). Las unidades de capacidad son divisiones de la subclase que se asemejan en posibilidades de uso y requerimientos de manejo y conservación.

La Clasificación por *Capacidad de Uso* fue adaptada para Venezuela por Comerma y Arias (1971) quienes realizaron una semi-cuantificación de los factores físicos que determinan las clases, desarrollando la calificación de factores específicos presentada en el Cuadro 2-1 y adaptándola para cada una de las Zonas de Vida (Holdridge, 1967) que conforman las regiones bioclimáticas del país, en sustitución del factor clima del método original. El procedimiento de los autores se sintetiza en el modelo teórico de la Figura 2-4.

Cuadro 2-1. Calificación de los factores específicos para la Clasificación por Capacidad de Uso de la Tierra. Fuente: Comerma y Arias (1971).

Factor (Limitación específica)	Limitación general	Valor (de la limitación específica)					
		1	2	3	4	5	6
Pendiente (p) %	T	0 - 3	3 - 8	8 - 20	20 - 45	45 - 60	> 60
Microrelieve (m)	T	Plano	Ondulaciones muy espaciadas	Ondulaciones de igual ancho y profundidad	Ondulaciones más profundas que anchas		
Erosión (e)	E	Ligera	Moderada	Fuerte	Severa		
Textura o granulometría (g)	S	a - aF	Fa - F - FAa	FL - FAL - FA - L	AL - Aa - A	Esquelético	
Pedregosidad o rocosidad (r)	S	Ligera	Moderada	Fuerte	Severa		
Profundidad u Hondura (h)	S	> 100	50 - 100	25 - 50	0 - 25		
Salinidad (s)	S	Ligera	Moderada	Fuerte	Severa		
Fertilidad (f)	S	Ligera	Moderada	Fuerte	Severa	Muy Severa	
Permeabilidad o conductividad (c)	S	Muy Lenta	Lenta	Moderada	Rápida	Muy Rápida	
Drenaje interno o nivel freático (n)	D	Muy Lento	Lento	Moderado	Rápido		
Drenaje externo o anegamiento (d)	D	Empozado	Muy Lento	Lento	Moderado	Rápido	
Inundación (i)	D	Sin	Ocasional	Frecuente	Muy Frecuente		

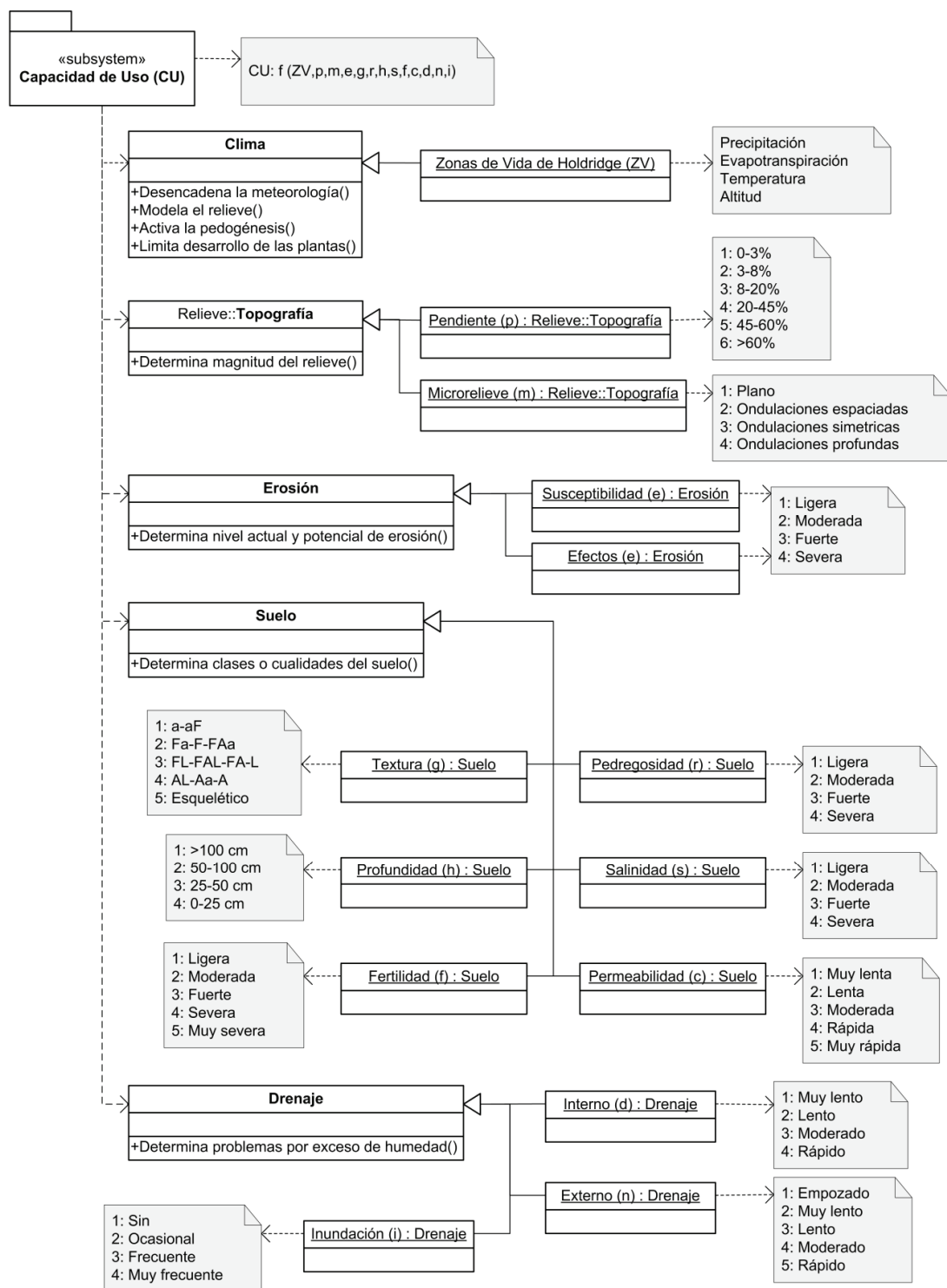


Figura 2-4. Modelo teórico para la Evaluación de la Capacidad de Uso de las Tierras.
Fuente: Adaptado de Comerma y Arias (1971).

Estos autores definieron dos niveles de manejo, uno usual, basado en una amplia gama de condiciones de aplicación de fertilizantes, pesticidas, mecanización y otras, pero sin incluir tecnología de riego y drenaje. El segundo nivel contempla prácticas agronómicas más intensivas y el uso de tecnología de riego y drenaje.

En la adaptación de Comerma y Arias (1971) el tipo de limitación general puede ser: Topografía (T), Erosión (E), Suelos (S) y Drenaje (D).

El tipo de limitación específica se indica señalando el valor correspondiente al factor que define la clase, según el Cuadro 2-1.

De acuerdo a Rossiter (1998), el sistema de clasificación original es subjetivo en la definición de clases y los términos calificativos de éstas son vagos e indefinidos, además de no considerar aspectos económicos ni permitir la evaluación para usos no generales de la tierra. Comerma y Arias (1971) solventan relativamente la subjetividad en la definición de clases, con las tablas de calificación de factores para cada región bioclimática del país y para cada nivel de manejo.

La LTDA (RBV, 2005) contempla un sistema de clasificación basado en 8 clases, equivalente al de *Capacidad de Uso*, pero haciendo consideraciones socio-económicas y políticas, por lo que las clases no son de *Capacidad*, sino de *Vocación de Uso*, reservando las mejores clases para los rubros prioritarios, de acuerdo a los planes nacionales y regionales de seguridad alimentaria. Los umbrales que definen las clases en la LTDA no son los mismos que los de la clasificación por *Capacidad de Uso* (Apéndice 1), pero conceptualmente las clases son equivalentes y ante la carencia de información, esta última se puede utilizar como apoyo para la implementación del impuesto territorial.

2.5. ESCALA CARTOGRÁFICA EN LA VALORACIÓN DE LAS TIERRAS

De acuerdo a las normas y especificaciones de la cartografía de suelos (Elizalde et al., 2000) el tamaño mínimo de la delineación cartográfica debe ser de 40 mm², para evitar que la línea límite de la unidad de suelo ocupe una superficie significativa de la delineación. Por otra parte, las unidades cartográficas aceptan hasta un 25% de inclusiones de suelos disimilares al suelo principal, las cuales no son mencionadas en la leyenda, por lo que el mapa debe permitir identificar suelos que ocupen mas de ¼ del área de planificación y así mitigar el problema de las inclusiones. Esto implica que el área mínima de planificación debe ser de al menos 4 veces la delineación de tamaño mínimo, es decir 160 mm². Los

mapas de *Capacidad de Uso* con cobertura nacional están disponibles principalmente a escala 1:250.000 ($1\text{mm}^2=6.25\text{ ha}$), lo que implica un área mínima de planificación de 1 000 ha ($6.25\text{ ha/mm}^2 \times 160\text{ mm}^2$) (Figura 2-5). Para los estudios de suelo semi-detallados 1:25.000, el área mínima de planificación es de 10 ha.

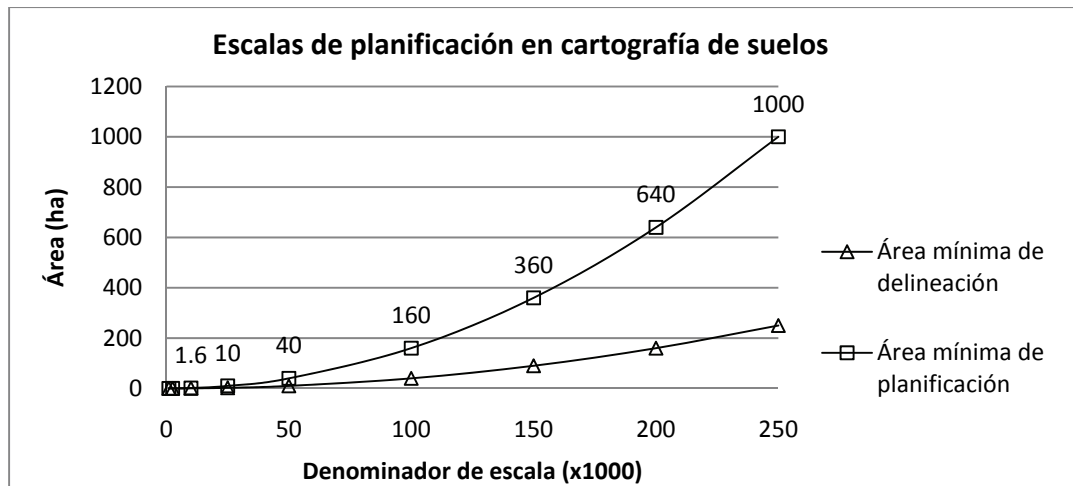


Figura 2-5. Áreas mínimas de planificación y de delineación de unidades cartográficas de suelo. Fuente: Elizalde et al. (2000).

La LTDA (ANRBV, 2005) establece la exoneración del impuesto sobre tierras ociosas para predios que no superen las 15 ha, lo que implica la necesidad de discriminar predios de este tamaño. Así mismo, el último censo agrícola publicado (MAC, 1998) establece que el 97% de la superficie agrícola del país es ocupada por predios mayores a 10 ha (aunque concentrados por 37% de los propietarios u ocupantes de tierras). Estas características sugieren que la escala adecuada para la gestión del impuesto territorial puede ser 1:25.000, sin embargo, la información de suelos a esta escala sólo cubre un 3% del territorio, por lo que se deben establecer metodologías que permitan utilizar los estudios detallados y semi-detallados disponibles en ese 3% del territorio para predecir, de manera expedita, la información del resto del país, apoyándose en los estudios a Gran Visión 1:250.000 y 1:100.000 existentes, mientras se avanza en el levantamiento detallado de la cartografía edafológica y el catastro nacional.

2.6. SÍNTESIS

En este capítulo:

1. Se realizó una revisión del marco legislativo venezolano vinculado con el impuesto territorial, principalmente la Ley de Tierras y Desarrollo Agrario (LTDA).
2. A partir de la revisión realizada, se ha formulado el modelo legislativo que define la *Vocación de Uso de la Tierra*, concepto determinante en el mecanismo de tributación territorial, descrito en la LTDA.
3. Con base en la metodología adaptada para Venezuela, se ha formulado el modelo teórico para la evaluación de la *Capacidad de Uso de la Tierra*, como uno de los componentes de la *Vocación de Uso*. La *Capacidad de Uso* se determina a partir de un conjunto de características y cualidades de los suelos, derivado de sus factores formadores, según se interpreta del modelo teórico formulado de la pedogénesis del suelo.
4. El modelo pedogenético formulado ha permitido identificar la relación entre los factores formadores del suelo con las variables geomorfométricas vinculadas a la *Capacidad de Uso*, relación que contribuye con la identificación de las variables adecuadas para la predicción de la *Capacidad de Uso* mediante modelado estadístico.
5. Finalmente, mediante consideraciones acerca de la escala de los estudios de suelo, se ha determinando que la unidad mínima de planificación en el área de estudio debería ser 160 ha, correspondiente a la escala 1:100.000 de los estudios de suelo disponibles en la región, aunque lo recomendable, con fines de tributación territorial, es un área mínima de 10 ha, equivalente a estudios a escalas 1:25.000, o de ser posible, mayores niveles de detalle.

CAPÍTULO 3

MODELO ESTADÍSTICO DE PREDICCIÓN DE SUELOS

3.1. INTRODUCCIÓN

El objeto central de esta tesis es el desarrollo de un modelo de geoprocесamiento para la valoración productiva y tributaria de las tierras agrícolas en Venezuela. La Ley de Tierras y Desarrollo Agrario (LTDA) venezolana define el impuesto predial con base en la determinación de la *Vocación y Capacidad de Uso* de las tierras agrícolas, para lo cual se requiere la evaluación de información edafológica de poca disponibilidad en el país. Ante la necesidad de obtener la información requerida para implementar los mecanismos del impuesto territorial, se propone el ajuste de un modelo estadístico que permita simular las variables de entrada del procedimiento de tributación establecido en la legislación venezolana, partiendo de la limitada información disponible. La variable a predecir corresponde a la *Capacidad de Uso de la Tierra* y las variables predictoras corresponden a atributos del relieve derivados de un DEM, fácilmente obtenible a partir de imágenes de sensores remotos. Un modelo estadístico apropiado y frecuentemente utilizado cuando se trata de predecir variables de naturaleza categórica (binomial o multinomial), es el modelo de regresión logística, seleccionado en esta investigación para desarrollar el modelo de geoprocесamiento que persigue determinar la *Capacidad de Uso de la Tierra* del área de estudio, como entrada al procedimiento de tributación territorial. En este capítulo se describe el fundamento teórico de este modelo estadístico, así como las técnicas de ajuste del modelo y los diferentes procedimientos que se pueden emplear para su validación.

3.2. MODELO DE REGRESION LOGÍSTICA MULTINOMIAL

Se adoptó un modelo de regresión logística multinomial considerando que la variable dependiente a predecir es multicategórica (clases de *Capacidad de Uso de la Tierra*). Además de su aplicación para variables multicategóricas, la regresión logística es una técnica no paramétrica que no demanda normalidad en la distribución de los datos y no asume una relación lineal entre la variable dependiente y las variables independientes.

Diversos autores han asumido este modelo para la cartografía predictiva de suelos y otras variables con reportes satisfactorios de resultados. Giasson et al. (2008) generó mapas de unidades taxonómicas de suelo en el sur de Brasil aplicando regresión logística sobre parámetros del terreno derivados del DEM SRTM, con referencia en mapas de suelo convencionales a escalas entre 1:30.000 y 1:50.000. Estos autores obtuvieron entre 61% y 71% de celdas clasificadas correctamente e índices Kappa entre 36% y 54%. Debella-Gilo et al. (2007) utilizaron regresión logística multinomial para la predicción de la distribución de

clases taxonómicas de suelo en el sureste de Noruega, a partir de atributos del terreno derivados de un DEM topográfico, obteniendo predicciones confiables excepto en las áreas que no son mayormente influenciadas por la topografía. Brening y Trombotto (2006) aplicaron un modelo de regresión logística binomial para predecir la distribución de glaciares en los Andes Chileno-Argentinos, a partir de parámetros del terreno derivados del DEM SRTM y muestreo de campo, obteniendo una tasa global de clasificación correcta de 69%. Gurdak (2006) evaluó la vulnerabilidad de los acuíferos a contaminación por nitratos en la región de Great Plains-USA, aplicando regresión logística multinomial sobre datos de una red de pozos de observación, capas de uso de la tierra, propiedades del suelo y profundidad freática. Las unidades de vulnerabilidad predicha mostraron un $R^2=0.82$ sugiriendo una buena capacidad predictora para áreas no monitoreadas. Racoviteanu (2004) utilizó regresión logística binomial y multinomial para predecir la localización de sitios arqueológicos en las montañas y glaciares andinos, obteniendo porcentajes correctos de estimación por encima de 90%. Ohlmacher y Davis (2003) usaron regresión logística multinomial para predecir el riesgo de deslizamiento del suelo en el noreste de Kansas, a partir de variables geomorfométricas básicas derivadas de un DEM topográfico (1:24.000) y unidades litológicas. Este estudio identificó, además de las zonas de riesgo, las variables morfométricas más influyentes en el riesgo de deslizamientos. Campling et al. (2002) ajustaron modelos logísticos multivariados para predecir clases de drenaje del suelo en Nigeria a partir de atributos generados de un DEM topográfico (1:50.000), índices de Landsat TM y muestreo de campo, obteniendo predicciones con concordancias que varían entre 99% y 65%.

En el modelo de regresión logística se codifican los valores de la variable dependiente como 0 y 1, lo que da como resultado que la media de la variable represente la proporción de casos que ocurren en una de sus dos categorías (en el caso binomial) o en una de sus múltiples categorías (en el caso multinomial). El valor predicho de la variable puede ser interpretado como la probabilidad de que un caso caiga en una de las categorías de la variable dependiente (Menard, 2002). Un modelo lineal no se ajusta apropiadamente a variables binomiales, dado que los valores predichos de la variable dependiente con este modelo (ajustados mediante la ecuación de una recta), pueden tomar valores imposibles de probabilidad, mayores que 1 o menores que 0, a pesar de que los valores observados estén entre 0 y 1. La misma situación se extiende a variables multinomiales.

El mejor modelo que linealiza la relación entre variable dependiente e independientes es el modelo logit, construido a través de regresión logística (Debella-Gilo et al., 2007). En una

variable dependiente binomial ($Y=0$; $Y=1$), sí se conoce la probabilidad de pertenecer a una clase ($Y=0$), se puede conocer la probabilidad de pertenecer a la otra clase ($Y=1$), es decir (Menard, 2002):

$$P(Y = 0) = [1 - P(Y = 1)] \quad (3.1)$$

Se puede tratar de aplicar el modelo lineal de probabilidad, expresado como:

$$P(Y = 1) = \beta_0 + \beta_1 X \quad (3.2)$$

Donde:

P es la probabilidad asociada a la variable predicha (Y),

X es la variable independiente o predictora,

β son los parámetros de la población a ser estimados,

Este modelo de probabilidad lineal sigue presentando el problema de no linealidad, con valores predichos que pueden ser menores que cero o mayores que uno.

Un paso a la solución del problema es reemplazar la Probabilidad [$P(Y=1)$] con el Odds ($Y=1$), el cual se expresa como:

$$Odds(Y = 1) = \frac{P(Y = 1)}{[1 - P(Y = 1)]} \quad (3.3)$$

Como se deduce de la Ecuación 3.3, el *Odds* puede variar entre 0 y $+\infty$, para valores de P entre 0 y 1, por lo que valores de *Odds* menores que 0 generan valores imposible de P (el valor de una variable puede ser cualquier cifra entre $-\infty$ y $+\infty$, sin embargo, en este modelo está restringida a valores entre 0 y $+\infty$). Para evitar esto se requiere otra transformación, conocida como *logit* (Y), que se expresa:

$$logit(Y) = Ln\left(\frac{P(Y = 1)}{[1 - P(Y = 1)]}\right) \quad (3.4)$$

El *logit* varía entre $-\infty$ y $+\infty$, cuando el *Odds* varía entre 0 y $+\infty$ (y P entre 0 y 1), por lo que se elimina el problema de que la probabilidad estimada pueda exceder el máximo o el mínimo posible.

Así, la ecuación de la relación entre la variable dependiente y las variables independientes es la siguiente:

$$\text{logit}(Y) = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \cdots + \beta_k x_k \quad (3.5)$$

El *logit* de la variable dependiente se puede convertir a *Odds* mediante la ecuación:

$$\text{Odds}(Y = 1) = e^{(\beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \cdots + \beta_k x_k)} \quad (3.6)$$

El *Odds* se convierte a probabilidad *P* mediante la expresión:

$$P(Y = 1) = \frac{e^{(\beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \cdots + \beta_k x_k)}}{1 + e^{(\beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \cdots + \beta_k x_k)}} \quad (3.7)$$

Cuando la variable dependiente tiene más de dos categorías, se aplica la versión multinomial de la regresión logística. Para una variable dependiente con *k* categorías, la regresión requiere (*k*-1) ecuaciones logísticas, una para cada categoría, en relación a otra categoría tomada como referencia. La relación se representa por las siguientes funciones (Eastman, 2006):

$$\begin{aligned} g_1(x) &= \text{Ln} \left[\frac{P(Y = 1 | X)}{P(Y = 0 | X)} \right] = \beta_{10} + \beta_{11} x_1 + \beta_{12} x_2 + \cdots + \beta_{1q} x_q \\ &= X' \beta' \end{aligned} \quad (3.8)$$

$$\begin{aligned} g_2(x) &= \text{Ln} \left[\frac{P(Y = 2 | X)}{P(Y = 0 | X)} \right] = \beta_{20} + \beta_{21} x_1 + \beta_{22} x_2 + \cdots + \beta_{2q} x_q \\ &= X' \beta' \end{aligned} \quad (3.9)$$

⋮

$$\begin{aligned} g_k(x) &= \text{Ln} \left[\frac{P(Y = k | X)}{P(Y = 0 | X)} \right] = \beta_{k0} + \beta_{k1} x_1 + \beta_{k2} x_2 + \cdots + \beta_{kq} x_q \\ &= X' \beta' \end{aligned} \quad (3.10)$$

Donde:

$g_k(x)$ es la función *logit* de la categoría *k* contra la categoría de referencia,

X es el vector de variables independientes, $X = (x_0 + x_1 + \cdots + x_q)'$,

β_{kq} es el vector de coeficientes, estimado para la categoría *k* y la variable *q*.

La probabilidad condicional de cada categoría clasificada (clases de *Capacidad de Uso*), dado el vector de variables independientes (parámetros geomorfométricos), se calcula con las siguientes expresiones:

$$P(Y = 0 | X) = \frac{1}{1 + e^{g_1(x)} + e^{g_2(x)} + \dots + e^{g_k(x)}} \quad (3.11)$$

$$P(Y = 1 | X) = \frac{e^{g_1(x)}}{1 + e^{g_1(x)} + e^{g_2(x)} + \dots + e^{g_k(x)}} \quad (3.12)$$

.

.

.

$$P(Y = k | X) = \frac{e^{g_k(x)}}{1 + e^{g_1(x)} + e^{g_2(x)} + \dots + e^{g_k(x)}} \quad (3.13)$$

Dado que las Ecuaciones 3.5 y 3.10 pueden tomar valores de $\pm\infty$ de la variable dependiente, el método de mínimos cuadrados ordinario no puede ser usado para estimar los parámetros. Como sustitución se utiliza el método de Máxima Verosimilitud para maximizar la función (*log-verosimilitud*), que indica la probabilidad de obtener el valor observado de Y , dados los valores de las variables independientes X y los parámetros $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k$ (Menard, 2002). La función de verosimilitud que se debe maximizar para encontrar el mejor ajuste de los parámetros tiene la siguiente forma general (Eastman, 2006):

$$L(\beta) = \prod_{i=1}^N \prod_{k=0}^k P(Y = k | X)^{y_{ki}} \quad (3.14)$$

Donde:

$L(\beta)$ es la función de verosimilitud a ser maximizada,

y_{ki} es el valor observado de la categoría k para la observación i , la cual puede tomar valores de 1 ó 0 (1 si hay observación y 0 si no hay), por tanto

$$\sum_{j=1}^k y_{ji} = 1,$$

N es el número total de observaciones.

Para maximizar la función de verosimilitud $L(\beta)$ se requiere solucionar un grupo de ecuaciones no lineales del siguiente tipo:

$$\frac{\partial \ln L(\beta)}{\partial \beta_{jp}} = \sum_{i=1}^N x_{pi} [y_{ji} - P(Y = k | X)] \quad (3.15)$$

Donde:

$\ln L(\beta)$ es el logaritmo de la función de verosimilitud $L(\beta)$

$\frac{\partial \ln L(\beta)}{\partial \beta_{jp}}$ es la primera derivada parcial de $\ln L(\beta)$ con relación al coeficiente β_{jp} ,

para $j = (1, 2, \dots, k)$ y $p = (0, 1, 2, \dots, q)$, con $x_{0i} = 1$

Para la solución de estas ecuaciones se puede utilizar el algoritmo de Newton-Raphson (Eastman, 2006).

3.3. BONDAD DE AJUSTE DEL MODELO LOGÍSTICO

En el análisis de regresión lineal la evaluación del modelo se basa en dos sumas de cuadrados, la Suma de Cuadrados Totales (SST) y la Suma de Cuadrados de Errores (SSE), que corresponden a las siguientes expresiones (Menard, 2002):

$$SST = \sum (Y_j - \bar{Y})^2 \quad (3.16)$$

$$SSE = \sum (Y_j - \hat{Y})^2 \quad (3.17)$$

Donde:

Y_j es el valor observado de la variable dependiente.

$\bar{Y}$ es la media de los valores de Y_j ,

$\hat{Y}$ es el valor de Y_j predicho por el modelo.

Una tercera suma es la Suma de Cuadrados de Regresión (SSR), que se expresa por:

$$SSR = SST - SSE \quad (3.18)$$

El coeficiente de determinación, R^2 , mide la proporción en la cual el uso de la ecuación de regresión reduce el error de predicción, con relación a la predicción de la media. Viene expresado por:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{j=1}^N (Y_j - \hat{Y})^2}{\sum_{j=1}^N (Y_j - \bar{Y})^2} = 1 - \frac{SSE}{SST} \quad (3.19)$$

Como prueba de la significancia estadística en la regresión lineal se utiliza corrientemente el cociente F multivariado, el cual permite probar si el mejoramiento en la predicción obtenido por usar $\hat{Y}$ en vez de $\bar{Y}$ es atribuible a variaciones aleatorias de la muestra. Este estadístico prueba dos hipótesis equivalentes:

$$H_0: R^2 = 0 \text{ y } H_0: \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_k = 0.$$

El cociente F con N casos y q variables independientes se calcula mediante la siguiente expresión:

$$F = \frac{(N - q - 1)SSR}{(q)SSE} \quad (3.20)$$

La significancia estadística alcanzada (p) asociada al cociente F , indica la probabilidad de obtener un R^2 tan grande como el R^2 observado, o coeficientes β tan grandes como los observados, si la hipótesis fuera cierta. Si p es pequeña (usualmente menor que 0.05) se rechaza la hipótesis nula y se concluye que hay una relación entre las variables independientes y la variable dependiente que no puede ser atribuida al azar. Si p es grande, entonces se acepta la hipótesis nula y se concluye que no hay suficiente evidencia para asegurar que la varianza explicada por el modelo no es atribuible a variación aleatoria de la muestra (Menard, 2002).

En el caso del modelo de regresión logística se utiliza el logaritmo de la verosimilitud (LnL) como criterio para encontrar los parámetros del modelo que hacen a los datos más probables. Dado que LnL es negativo (L toma valores entre 0 y 1), por conveniencia se multiplica por -2, con lo que $-2LnL$ pasa a ser positiva. A mayores valores de $-2LnL$ peores predicciones en la variable dependiente (Menard, 2002; Eastman, 2006).

La razón de verosimilitud, utilizada como principio para evaluar la bondad de ajuste del modelo se basa en dos estadísticos:

$-2LnL_0$, que corresponde a la función de verosimilitud si todos los coeficientes excepto el intercepto son 0,

$-2LnL_m$, que corresponde a la función de verosimilitud para el modelo completo, tal como es ajustado con las variables independientes.

La razón de verosimilitud, referida como Modelo χ^2 , se expresa por la ecuación:

$$\text{Modelo Chi Cuadrado: } \chi_m^2 = -2\text{Ln}L_m - 2\text{Ln}L_0 \quad (3.21)$$

Esta razón puede ser interpretada como el estadístico χ^2 , proporcionando una prueba de la hipótesis nula, según la cual $\beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_k = 0$, en el modelo de regresión logística. Si χ_m^2 es estadísticamente significativo ($p \leq 0.05$) se rechaza la hipótesis nula y se concluye que la información aportada por las variables independientes permiten hacer una mejor predicción de $P(Y = k)$, con relación a la predicción que se pudiera hacer sin las variables independientes (Menard, 2002).

Para la medición de la múltiple asociación entre las variables independientes y la variable dependiente y evaluar la bondad de ajuste, se han desarrollado varios pseudo R^2 , llamados así porque son similares, en escala e interpretación, al R^2 generado por Mínimos Cuadrados Ordinarios (OLS) en regresión lineal (aunque algunos de éstos nunca alcanzan valores de 0 ó 1). Los valores más altos indican un mejor ajuste del modelo.

Entre los R^2 comúnmente encontrados se tiene el de McFadden (R_m^2), considerado por Menard (2002) como el más apropiado para regresión logística, entre otras consideraciones por su cercanía al R^2 de OLS. Este estadístico viene dado por la expresión:

$$R_m^2 = 1 - \frac{\text{Ln}L_m}{\text{Ln}L_0} \quad (3.22)$$

Un R_m^2 de 1 indica un ajuste perfecto, mientras que un valor de 0 indica que no hay relación. Clark y Hosking (1986) consideran que un R_m^2 entre 0.2 y 0.4 es muy bueno y que el analista no debería buscar valores mayores a 0.9, como es el caso cuando se trabaja con R^2 en OLS. Según UCLA (2009), el pseudo R^2 no puede ser interpretado independientemente o comparado entre conjuntos de datos; ellos son válidos y útiles en la evaluación de múltiples modelos que predicen los mismos resultados con el mismo conjunto de datos, es decir, un pseudo R^2 sólo tiene significado cuando se compara con otro pseudo R^2 del mismo tipo, en los mismos datos y prediciendo los mismos resultados. Así, el más alto pseudo R^2 indica cual modelo predice mejor los resultados.

3.4. ANÁLISIS DEL ERROR DE CLASIFICACIÓN

Otro enfoque para evaluar la bondad de ajuste del modelo y validar su aplicación es analizar el error de clasificación. Para ello se crea la matriz de confusión o tabla de

contingencia (Chuvieco, 2002). En esta matriz las columnas suelen indicar las clases del mapa de referencia (clases de pertenencia de las celdas) y en las filas, las categorías deducidas de la clasificación (clases de asignación de las celdas). Es una matriz cuadrada: $n \times n$, donde n indica el número de categorías. Los valores situados en la diagonal principal representan las celdas correctamente clasificadas de cada categoría, mientras los marginales corresponden a errores de asignación (Chuvieco, 2002; Ormeño, 2006).

Las estadísticas derivadas de la matriz de confusión son (Chuvieco, 2002):

- Fiabilidad global del mapa ($\hat{F}$), dada por la relación entre el número de celdas correctamente asignadas y el total, es decir:

$$\hat{F} = \frac{\sum_{i=1}^n X_{i,i}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n X_{i,j}} \quad (3.23)$$

Donde:

$X_{i,i}$ es la diagonal de la matriz en la columna i , fila i ,

$X_{i,j}$ es el valor de la fila i columna j de la matriz.

- Errores de Omisión (E_o), correspondientes a las celdas que perteneciendo a una determinada categoría no son incluidos en ella (marginales de las columnas). Vienen dados por:

$$E_o_i = \frac{X_{+,i} - X_{i,i}}{X_{+,i}} \quad (3.24)$$

Donde:

$X_{+,i}$ es el marginal de la columna i .

- Errores de Comisión, correspondientes a las celdas que se incluyeron en una determinada categoría perteneciendo realmente a otra. Vienen dados por:

$$E_c_i = \frac{X_{i,+} - X_{i,i}}{X_{i,+}} \quad (3.25)$$

Donde:

$X_{i,+}$ es el marginal de la fila i .

Para estudiar las relaciones múltiples entre las distintas categorías se introdujeron técnicas de análisis categórico en el estudio de las matrices de confusión. Uno de los índices más empleado es el estadístico Kappa ($\hat{k}$), que mide la concordancia mapa-realidad observada y la que cabría esperar simplemente por azar (Chuvieco, 2002).

La Fiabilidad Global ($\hat{F}$) es un estadístico directo pero de dudosa interpretación debido al elevado número de celdas que pueden ser clasificadas correctamente debido al azar (Pontius, 2000). Por esto es necesario incorporar la proporción esperada de clasificación correcta debido al azar en los índices de concordancia, tal como lo hace $\hat{k}$. La estimación del índice $\hat{k}$ se hace a partir de la siguiente expresión (Chuvieco, 2002):

$$\hat{k} = \frac{n \sum_{i=1}^n X_{i,i} - \sum_{i=1}^n (X_{+,i} X_{i,+})}{n^2 - \sum_{i=1}^n (X_{+,i} X_{i,+})} = \frac{(P_o - P_c)}{(P_p - P_c)} \quad (3.26)$$

Donde:

$n \sum_{i=1}^n X_{i,i}$ corresponde a la proporción de celdas correctas observada: P_o ,

$\sum_{i=1}^n (X_{+,i} X_{i,+})$ corresponde a la proporción de celdas correctas esperada por azar: P_c ,

n^2 corresponde a la proporción de celdas correctas cuando la clasificación es perfecta: P_p .

Si la clasificación realizada es perfecta, entonces ($\hat{k} = 1$), hay una coincidencia plena entre la realidad y la clasificación. Si ($P_o = P_c$), entonces ($\hat{k} = 0$) y la concordancia observada es igual a la esperada por azar. Si ($\hat{k} = -1$), hay un total desacuerdo realidad-clasificación.

Pontius (2000) identifica tres principales problemas en el índice $\hat{k}$:

- a) falla en penalizar errores de cuantificación grandes;
- b) falla en recompensar suficientemente cuando la simulación es cercana a la realidad;
- c) falla en distinguir claramente entre errores de cuantificación y errores de localización.

Para solucionar estos problemas propone variantes de $\hat{k}$ con capacidad para especificar la cantidad y localización.

Por otra parte la matriz de confusión falla en distinguir entre errores cercanos y lejanos, registrando una concordancia de cero cuando las celdas no se clasifican correctamente, aun cuando la categoría correcta se encuentre en las celdas vecinas. La matriz tampoco toma en cuenta los éxitos parciales cuando las celdas tienen una pertenencia parcial a una categoría (en clasificación difusa). Pontius (2002) toma en cuenta estos aspectos desarrollando estadísticos para mapas categóricos en resoluciones múltiples, los cuales se aplican sobre pares de mapas que estén clasificados en cualquier combinación de categorías difusas y nítidas. Específicamente los mapas deben cumplir las siguientes condiciones:

- El mapa real (R) y el mapa simulado (S) deben tener la misma estructura de celdas.
- En cada celda debe haber una distribución multinomial de categorías que cumplan con las siguientes cuatro ecuaciones:

$$0 \leq R_{n,j} \leq 1 \quad (3.27)$$

$$0 \leq S_{n,j} \leq 1 \quad (3.28)$$

$$\sum_{j=1}^J R_{n,j} = \sum_{j=1}^J S_{n,j} = 1 \quad (3.29)$$

$$\sum_{n=1}^{N_g} \sum_{j=1}^J R_{n,j} = \sum_{n=1}^{N_g} \sum_{j=1}^J S_{n,j} = N_g \quad (3.30)$$

Donde:

J es el número de categorías,

$R_{n,j}$ es la proporción de la categoría j en la celda n del mapa R ,

$S_{n,j}$ es la proporción de la categoría j en la celda n del mapa S ,

N_g es el número de celdas en el mapa a la resolución g .

Pontius (2002) convierte la estadística convencional a estadística de múltiple resolución permitiendo la concordancia parcial entre las celdas de un mapa y las celdas correspondientes del otro mapa, para lo cual permite que cada celda tenga pertenencia parcial a cualquiera de las categorías. La concordancia para la categoría j en la celda n se define como el mínimo entre $R_{n,j}$ y $S_{n,j}$. Así, la concordancia total sobre todas las categorías J en cualquier celda es:

$$\text{Proporción de concordancia en la celda } n = \sum_{j=1}^J \text{MIN}(R_{n,j}, S_{n,j}) \quad (3.31)$$

El operador mínimo (MIN) tiene sentido, dado que la concordancia a encontrar entre dos mapas (real y simulado), corresponde al valor más pequeño de las proporciones de pertenencia en cada categoría de clasificación (Pontius y Suedmeyer, 2004).

La técnica de análisis a resolución múltiple (Pontius, 2002) considera como resolución más detallada de los mapas, la generada por el modelo de clasificación, basada en la resolución del mapa real. En un segundo nivel de análisis esta resolución se ajusta, mediante una contracción de 2 x 2 celdas (se agregan cuatro de las celdas de la resolución detallada en una sola celda). La siguiente resolución es una contracción de 3 x 3 celdas (se agregan nueve celdas en una) y así sucesivamente hasta que el área de estudio se ubica en una sola celda. Con esta técnica, si hay muchos errores cercanos en el mapa simulado a la resolución detallada, entonces la concordancia crecerá rápidamente en las primeras etapas de agregación. Si hay muchos errores lejanos, entonces la concordancia no crecerá hasta las últimas etapas de agregación.

Si el área de estudio no es perfectamente cuadrada entonces la técnica de agregación no tendrá el mismo número de celdas en todas partes por lo que se debe ponderar cada celda con un peso, W_n , correspondiente al número de celdas, a resolución detallada, que conforman las celdas agregadas.

En la Figura 3-1 se presentan las expresiones matemáticas derivadas por Pontius (2002) para la representación de la concordancia entre nueve pares de mapas. Cada uno de los nueve pares de puntos es definido por la notación (X, Y) , donde X es un vector que da la proporción de cada categoría en el mapa S y Y es la proporción de concordancia cuando se comparan los mapas S y R . La expresión al centro de la Figura 3-1, donde $X=m$, da la concordancia $M(m)$ entre los mapas R y S . Las otras ocho expresiones son concordancias idealizadas entre el mapa R y un mapa S hipotético. El eje horizontal de la Figura 3-1 muestra tres niveles de concordancia en relación a la cantidad de cada categoría encontrada en el mapa S . El eje vertical muestra tres niveles de concordancia en relación a la localización.

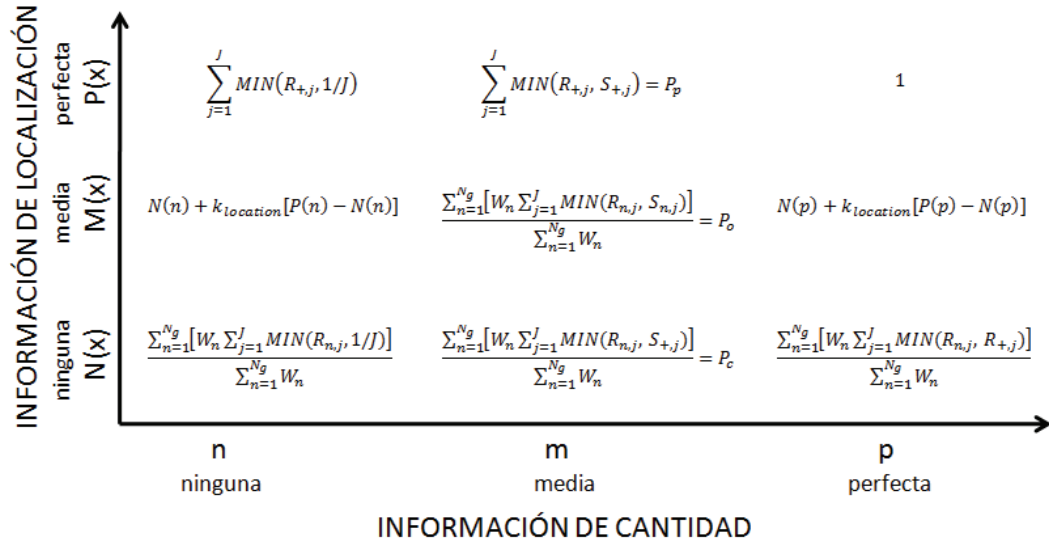


Figura 3-1. Expresiones matemáticas para el cálculo de la concordancia entre nueve pares de mapas. La expresión al centro (P_o) es la proporción observada de clasificación correcta (la mayoría de los modelos tienen una capacidad media para predecir tanto cantidad como localización). Las otras ocho expresiones son concordancias idealizadas realidad-simulación. (Las variables se definen en el texto). Fuente: Pontius (2002).

Las variables de las expresiones de la Figura 3-1 son:

- n muestra el nivel de concordancia en simulaciones hipotéticas que no tienen información relativa a la cantidad,
- m muestra simulaciones con un nivel medio de información relativa a la cantidad (proporción observada de clasificación correcta),
- p muestra simulaciones hipotéticas que tienen perfecta información relativa a la cantidad,
- N muestra la concordancia para simulaciones que no tienen información relativa a la localización (cada categoría se distribuye uniformemente en todo el paisaje),
- M muestra la concordancia para simulaciones con un nivel medio de información sobre localización (proporción observada de clasificación correcta),

P muestra la concordancia para simulaciones hipotéticas con perfecta información relativa a la localización,

$$R_{+,j} = \frac{\sum_{n=1}^{N_g} (W_n R_{n,j})}{\sum_{n=1}^{N_g} W_n} \quad (3.32)$$

$$S_{+,j} = \frac{\sum_{n=1}^{N_g} (W_n S_{n,j})}{\sum_{n=1}^{N_g} W_n} \quad (3.33)$$

$k_{location}$ es el índice Kappa para la localización y su formula se indica en el Cuadro 3-1.

Cuadro 3-1. Formulas para índices de comparación. Fuente: Pontius (2002).

Parámetro	Formula	Descripción
Porcentaje correcto	$M(m)$	
k_{no}	$\frac{M(m) - N(n)}{P(p) - N(n)}$	Índice global de concordancia, donde $P_c = N(m)$ y $P_p = P(p)$
$k_{location}$	$\frac{M(m) - N(m)}{P(m) - N(m)}$	Índice que mide la concordancia sólo en términos de la localización, donde $P_c = N(m)$ y $P_p = P(m)$
$k_{quantity}$	$\frac{M(m) - M(n)}{M(p) - M(n)}$	Índice que mide la concordancia sólo en términos de la cantidad, donde $P_c = M(n)$ y $P_p = M(p)$
$k_{standard} = k$	$\frac{M(m) - N(m)}{P(p) - N(m)}$	$k = \frac{(P_o - P_c)}{(P_p - P_c)}$

Pontius y Suedmeyer (2004) incorporan a la técnica desarrollada por Pontius (2002, 2000) el análisis estratificado, con el cual los mapas R y S pueden estar divididos en regiones homogéneas. Con esta incorporación la proporción observada de clasificación correcta (P_o), que tiene una capacidad media para predecir cantidad y localización, se expresa por la siguiente ecuación:

$$M(m) = \frac{\sum_{d=1}^D \sum_{n=1}^{N_g} W_{d,n} [\sum_{j=1}^J MIN(R_{d,n,j}, S_{d,n,j})]}{\sum_{d=1}^D \sum_{n=1}^{N_g} W_{d,n}} = P_o \quad (3.34)$$

Donde:

d es el estrato del mapa.

D es el número total de estratos en el mapa.

En este análisis todas las expresiones presentadas en la Figura 3-1 son modificadas al igual que la formula 3.34 para incluir el análisis de estratos.

3.5. SÍNTESIS

En este capítulo:

1. Se ha presentado la fundamentación matemática del modelo de regresión logística, para su aplicación en la predicción de la *Capacidad de Uso* de las tierras del Estado Aragua, a partir de variables independientes geomorfométricas.
2. Se ha descrito la formulación para linealizar la relación entre la variable dependiente y las variables independientes, mediante el desarrollo secuencial del modelo lineal de probabilidad, el modelo Odds (razón de probabilidad) y el modelo logit (logaritmo de Odds), tanto para regresión binomial como multinomial.
3. Se ha descrito el método de Máxima Verosimilitud, empleado para determinar los parámetros del modelo logístico.
4. Se ha presentado la formulación logística inversa, empleada para convertir las predicciones del modelo logit a probabilidades de ocurrencia de cada una de las categorías del mapa de *Capacidad de Uso de la Tierra*.
5. Adicionalmente se han descrito los procedimientos para evaluar la bondad de ajuste del modelo logístico, haciendo hincapié en la razón de verosimilitud (modelo χ^2) y en el Índice de McFadden (pseudo R^2).
6. Como otro enfoque para evaluar o validar los resultados del modelo se ha descrito la Matriz de Contingencia y el Índice de Concordancia Kappa ($\hat{k}$). Para este último estadístico se presenta una variante que mide la concordancia predicción/realidad, tanto en términos de cantidad (de celdas correctamente clasificadas), como en términos de localización.

CAPÍTULO 4

VARIABLE DEPENDIENTE. EL ÁREA DE ESTUDIO

4.1. INTRODUCCIÓN

Para la aplicación del modelo estadístico con el que se persigue predecir la *Capacidad de Uso de la Tierra*, se debe probar si hay relación entre la variable a predecir y las variables predictoras, así como la fortaleza de la relación. Como variable a predecir (dependiente) se ha seleccionado la información sobre *Capacidad de Uso de la Tierra*, disponible y actualizada, para sectores específicos denominados Áreas de Referencia, de los distintos ambientes eco-geográficos del Estado Aragua. Estos sectores constituyen el área de muestreo para el ajuste o calibración del modelo, así como para aplicar los procedimientos de validación de las predicciones realizadas sobre las categorías de *Capacidad de Uso de la Tierra*. En este capítulo se describe el área total de estudio, así como cada una de las Áreas de Referencia seleccionadas para el ajuste del modelo de regresión.

4.2. ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio comprende al Estado Aragua, región administrativa ubicada en el centro norte de Venezuela y que ocupa una superficie de 7 212.88 km². El Estado se extiende entre los 9°15' y 10°32' de Latitud Norte y 66°32' y 67°52' de Longitud Oeste (WGS84). Se seleccionó esta región dada la disponibilidad de información sobre la variable *Capacidad de Uso de la Tierra* en todo el territorio estatal, actualizada en algunos sectores que serán tomados como referencia. Además se dispone de la cartografía topográfica básica (1:100.000 y 1:25.000), ortofotos digitales y series de datos de la red de estaciones climáticas. Otro elemento importante considerado es el relativo pequeño tamaño del Estado, en comparación con otras regiones administrativas, y su representatividad, en relación a los principales paisajes fisiográficos sobre los que se desarrollan los sistemas agrícolas del país. La superficie del estado se conforma por una franja estrecha de dirección NO-SE-S, con un ancho que varía entre 18 y 70 km y un largo de 190 km aproximadamente (Figura 4-1). Esta configuración particular sugiere una especie de transecta que se extiende a través de ecosistemas y geoformas bien diferenciadas y que se pueden considerar representativas de la región del país ubicada al norte del río Orinoco, características adecuadas para el desarrollo de una metodología regional que se propone aplicar a regiones administrativas nacionales equivalentes. De acuerdo a Sucre (2003) el Estado se divide en cinco zonas eco-geográficas:

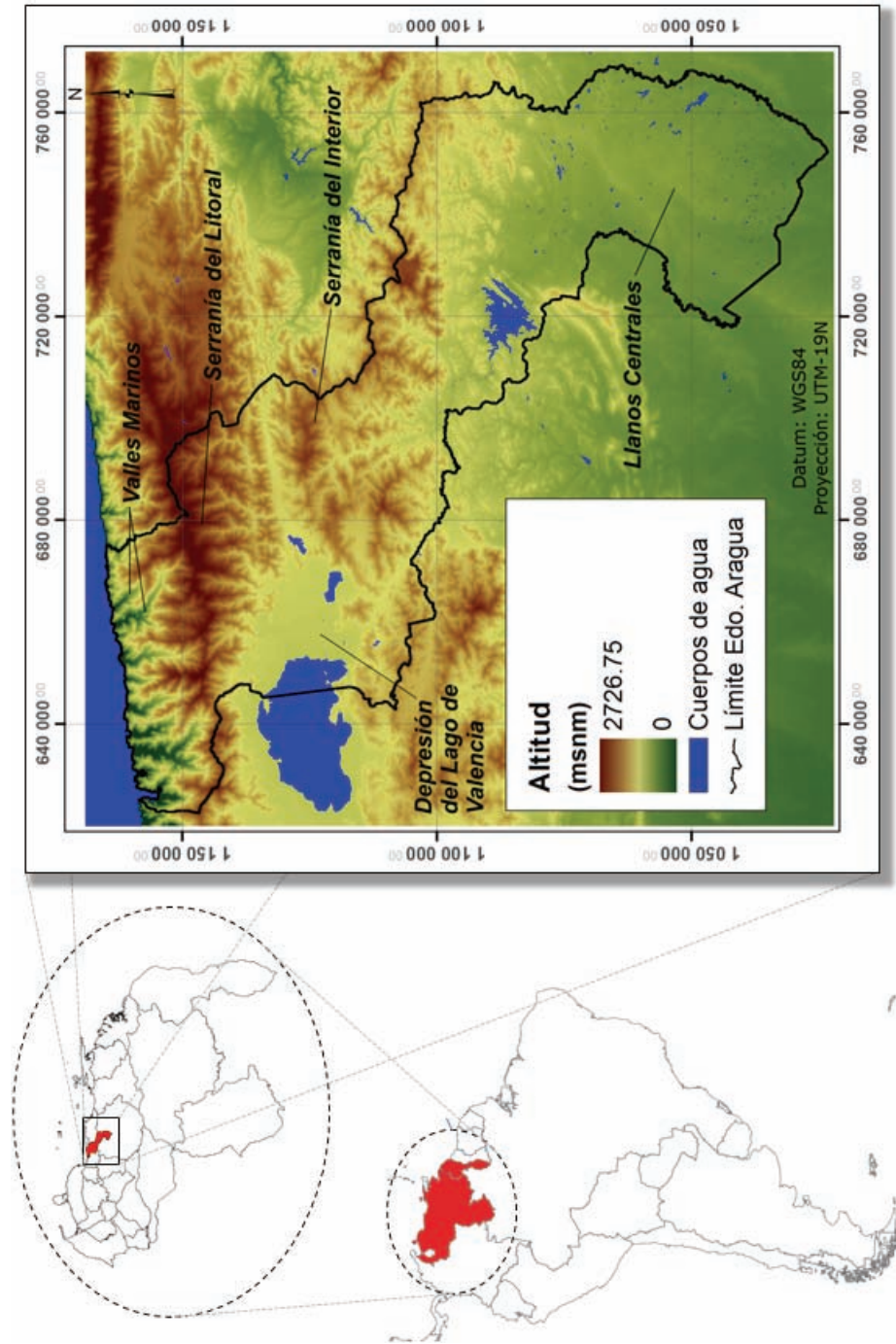


Figura 4-1. Ubicación del área de estudio y sus zonas eco-geográficas, Estado Aragua-Venezuela.

4.2.1. Valles Marinos de la Cordillera de la Costa

Se ubican al norte del Estado, en la vertiente norte de la Serranía del Litoral, y sus aguas drenan en sentido S-N hasta desembocar en el Mar Caribe (Figura 4-1). Forman parte del sistema fisiográfico de la Serranía del Litoral pero se describen separadamente de éste por su relieve plano característico y por su importancia socio-económica en el Estado (Sucre, 2003). Los principales valles son Turiamo, Ocumare de la Costa, Cata, Cuyagua, Aroa y Choróní.

Las características físico-naturales de esta región se sintetizan en el Cuadro 4-1.

4.2.2. Serranía del Litoral

En conjunto con la Serranía del Interior forma la Cordillera de la Costa, que es un ramal de la Cordillera de Los Andes. Las dos serranías se bifurcan en el macizo de Nirgua, Estado Yaracuy, al occidente del área de estudio. Desde allí ambas se extienden en dirección O-E. La Serranía del Litoral se ubica al norte del área de estudio y tiene un trazado paralelo a la línea costera (en la Figura 4-1 se muestra su ubicación y en el Cuadro 4-1 sus características).

4.2.3. Serranía del Interior

Se ubica al sur de la Serranía del Litoral, constituyendo la mitad meridional de la Cordillera de la Costa. Entre ambas estructuras flanquean los llamados Valles de Aragua, controlados por el sistema de fallas de La Victoria. Esta serranía, en el tramo de Aragua tiene un relieve bastante disectado aunque es menos imponente que la del Litoral (Figura 4-1 y Cuadro 4-1).

4.2.4. Depresión del Lago de Valencia

Se ubica entre las Serranías del Litoral y del Interior. Es una cuenca endorreica que colecta las aguas que descienden de las dos serranías, entre ellas las del río Aragua que en su cauce bajo recorre el Estado en dirección E-O, formando, conjuntamente con la planicie lacustrina, los Valles de Aragua (Figura 4-1 y Cuadro 4-1).

4.2.5. Llanos Centrales

Se extienden al sur del Estado, desde el piedemonte de la vertiente sur de la Serranía del Interior, conformando una fisiografía de altiplanicie. Es la zona más extensa y despoblada del Estado (Figura 4-1 y Cuadro 4-1).

Cuadro 4-1. Características físico-naturales de las zonas eco-geográficas de Estado Aragua. Fuente: Sucre (2003).

Zona	Geomorfología	Relieve	Suelos	Clima	Vegetación
Valles marinos de la Cordillera de la Costa	Son valles deposicionales coluvio-aluviales con litología compuesta principalmente por aluviones	Valles pequeños con ríos que drenan sus aguas en sentido sur-norte hasta desembocar en el mar Caribe	Fértiles, de texturas medias, estructura estratificada, origen cuaternario, profundos, bien drenados. CU: Ills y VII.	BMST. Tma 26-28 °C. Pma 795 mm. ETPma 1120-1360 mm. Vientos alisios del NE	Espinares, cardonales
Serranía del Litoral	Medios de ablación de montañas y colinas	Sistema montañoso irregular. Vertiente norte que da al Mar Caribe con relieve fuertemente abrupto. Vertiente sur con filas agudas que bajan al sur hasta la depresión del Lago de Valencia. El pico más alto es El Cenizo con 2435 m. Otro pico es La mesa con 2330 m.	Baja a mod. fertilidad, frec. pedregosos, afloramientos rocosos ocasionales. Texturas medias. Drenaje externo rápido a mod. rápido, interno moderado. Ácidos. Usualmente profundos (100/150 cm). Predominan Tropohumults, Tropoudults, Dystrypepts. CU: IV a VIII.	Vertientes septentrionales más húmedas que las meridionales. Formación de nieblas entre 1000 y 2000 msnm. BHPM, BHMB, BMHMB (ladera norte), BSPM, BST, BMST (ladera sur). Tma 15-26 °C, Pma 800-2200 mm, ETPma 1120 a 1600 mm	Bosques tropófilos basimontanos, caducifolios, bosques ombrófilos semicaducifolios, subsiempreverdes, bosques nublados siempreverdes, arbustos (subpáramo), matorrales tropófilos caducifolios.
Depresión del Lago de Valencia	Depresión tectónica, plana. Medios de ablación de colinas al norte, medios deposicionales coluvio-aluviales en el valle y, al este del lago, medio deposicional de litoral lacustrino con riesgo de inundación anual	Cuenca endorreica formada por una depresión intramontana de origen tectónico con orientación E-O y enclavada entre la Serranía del Litoral (al norte) y la Serranía del Interior (al sur). Constituida por: planicie lacustrina, planicie aluvial, valles periféricos y piedemonte	68% de suelos F y Fa, 13% Aa, AL y A. Suelos fértiles, profundos, bien drenados. Predominan Entisoles, Inceptisoles, Mollisoles y Vertisoles. CU: I a V	BST y BSPM. Tma 24,6 °C, Pma 800-1300 mm, ETPma 1413 mm, HRma 81%.	Vegetación natural muy intervenida, constituida por remanentes de bosques originales.

Zona	Geomorfología	Relieve	Suelos	Clima	Vegetación
Serranía del Interior	Medios de ablación de colinas y montañas.	Paisaje de montaña alta, subpaisaje de lomas, colinas y valles profundos. Alturas variables entre 500 y 1900 m. El pico más alto es el Platillón con 1931 m.	Baja fertilidad, textura media, poco profundos, drenaje externo rápido e interno moderado. Similares a los de la Serranía de a Costa salvo en los niveles de erosión.	BST, BSPM y BHPM: Tma 22-26 ° C, Pma 900-2000 mm, ETPma 1360-1920 mm	Sabana-chaparral tropical, herbazal tropical, matorral premontano semideciduo, bosque premontano siempreverde y semideciduo. Palmas dominantes en algunas situaciones.
Llanos Centrales	Piedemonte plano y ondulado con glaciares de explayamiento. Afectado por erosión laminar discontinua.	Piedemonte ondulado con algunas áreas planas entremezcladas. Cuenca de ablación con fisiografía de altiplanicie. El paisaje más extenso es la altiplanicie de denudación, caracterizado con relieve de colinas y lomas.	58% de suelos FA, FAa, FAI, 29% Aa, AL, A. Problemas de acidez y drenaje. De origen residual, fertilidad moderada a baja, drenaje interno lento y externo rápido. Generalmente aparecen manchas de granzón, piedras y aflora el material parental. Predominan Inceptisoles, Vertisoles, Alfisoles y Ultisoles. CU:IV a VI.	BST. Tma 26 °C, Pma 1150 mm, ETPma 1763 a 1800 mm.	Predominio de sabanas, bosques de galería, palmares y bosques semicaducifolios.

CU: Clase de *Capacidad de Uso*; BMST: Bosque Muy Seco Tropical; BST: Bosque Seco Tropical; BSPM: Bosque Seco Premontano; BHPM: Bosque Húmedo Premontano; BHMB: Bosque Húmedo Montano Bajo; BMHMB: Bosque Muy Húmedo Montano Bajo; Tma: Temperatura media anual; Pma: Precipitación media anual; ETPma: Evapotranspiración media anual; HRma: Humedad Relativa media anual.

4.3. ÁREAS DE REFERENCIA PARA EL MODELO DE PREDICCIÓN

Strebin y Pérez (1974) realizaron un estudio de clasificación de la *Capacidad de Uso* de las tierras del Estado Aragua con la finalidad de obtener información sobre su aptitud para el desarrollo agropecuario. En este estudio los autores utilizaron el sistema de clasificación de Klingebiel y Montgomery (1961). La clasificación elaborada se hizo en función del nivel tecnológico que emplean comúnmente los agricultores empresariales del Estado o Estados vecinos (uso de maquinaria, pesticidas, semillas certificadas y fertilizantes). La clase asignada a algunas unidades de tierra puede mejorar si los agricultores emplean un nivel de manejo mas intensivo al considerado, con lo que se superarían ciertas limitaciones encontradas en los suelos, o por el contrario puede empeorar con un uso irracional del recurso, por lo que la edad actual del estudio impone ciertas limitaciones para su utilización. Mediante esta clasificación se generó un mapa a escala 1:100.000 con clases y subclases de capacidad.

Se han realizado estudios más recientes en algunos sectores y cuencas hidrográficas del Estado los cuales, en algunos casos, sólo han utilizado y revisado la clasificación y en otros, la han actualizado o generado nuevas clasificaciones a escala más detallada en el ámbito local, además de estudiar otros parámetros ambientales (Biasino, 1983; Jaimes, 1985; Biasino et al., 1990; Vilorio et al., 1998; Abreu, 2000; Jácome et al 2001a, Jácome et al., 2001b; SIACRA, 2005; SISDELAV, 2005; SIACARG, 2005; CEAEA, 2005; Pineda et al., 2006; Machado et al., 2007; Abarca, 1998; Abarca y Bernabé, 2008a; Abarca y Ormeño, 2009). A partir de estos estudios se seleccionaron cinco sectores en los que, además de la revisión o actualización de la variable *Capacidad de Uso de la Tierra*, se han caracterizado otras variables ambientales (Figura 4-2). En estos sectores se realiza el muestreo estadístico de la variable a predecir (*Capacidad de Uso*) y se controla la generación de las variables predictoras.

Los sectores seleccionados se ubican en las zonas eco-geográficas del Estado Aragua, aunque no se incluyen los Valle Marinos, dado que en este sector no hay información disponible actualizada de la variable Capacidad de Uso de la Tierra. Estos valles sin embargo, fisiográficamente forman parte de la Serranía del Litoral, por lo que están representados por las Áreas de Referencia tomadas en esta zona. Las Áreas de Referencia seleccionadas son:

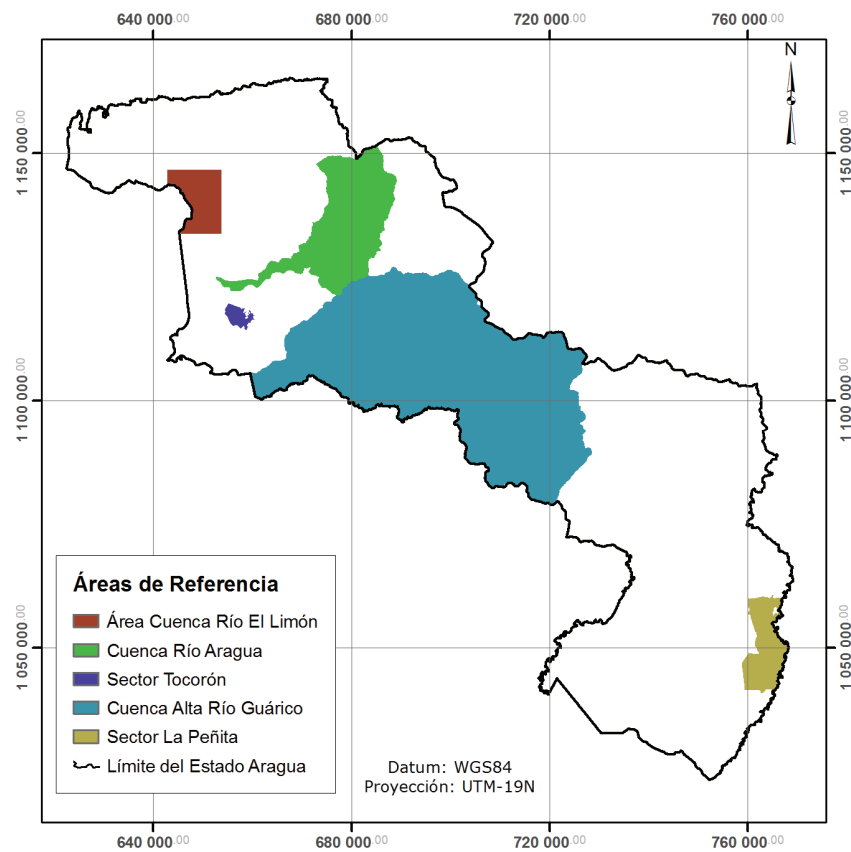


Figura 4-2. Ubicación de Áreas de Referencia para el muestreo de la variable dependiente.

4.3.1. Cuenca Alta del Río El Limón

Este sector se ubica en la zona eco-geográfica Serranía del Litoral, en su vertiente sur, y ocupa una superficie de 107.14 km². Se estudio un área semi-rectangular correspondiente a un sector de ortofoto que abarca la cuenca alta del río El Limón y áreas aledañas. Se chequeó en campo la delimitación de las clases y subclases de *Capacidad de Uso*, identificadas por Strebin y Pérez (1974), actualizadas por CEAEA (2005) (Apéndice 2), así como otras variables ambientales evaluadas por Abarca y Rodríguez (2005) y Abarca y Bernabé (2008a).

En la Figura 4-3 se muestra una representación en perspectiva del relieve de este sector en el Estado Aragua. En la Figura 4-4 se observan las clases generales de *Capacidad de Uso* identificadas. El fuerte relieve predominante determina que la principal clase de *Capacidad de Uso* existente corresponda a la VII, con casi el 68% de la superficie total del sector (Cuadro 4-2).



Figura 4-3. Relieve en perspectiva del área de referencia Cuenca Alta del Río El Limón, Estado Aragua (Serranía del Litoral).

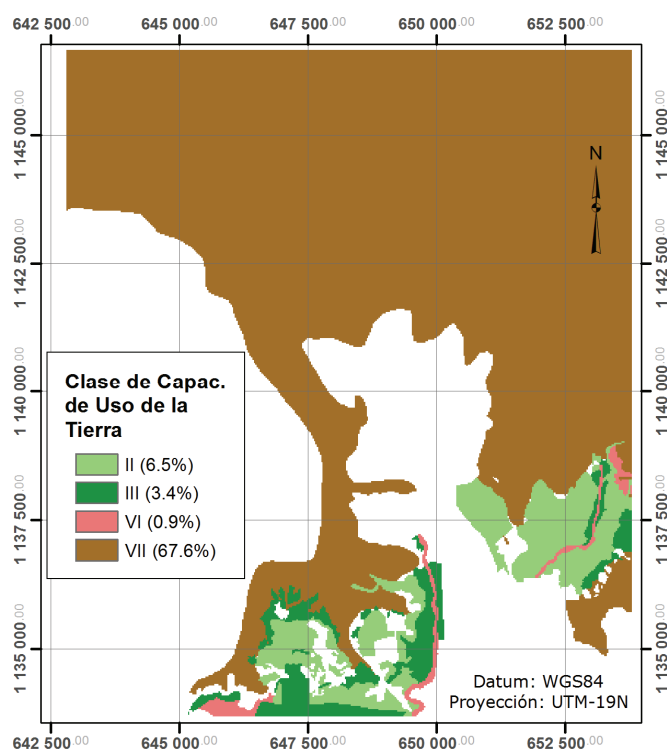


Figura 4-4. Capacidad de Uso de la Tierra en la Cuenca Alta del Río El Limón, Estado Aragua. Fuente: CEAEA (2005).

Cuadro 4-2. Superficie de las Clases de Capacidad de Uso en los sectores tomados como Áreas de Referencia para el modelo de predicción.

	El Limón		Tocorón		Río Aragua		Río Guárico		La Peñita	
	(ha)	(%)	(ha)	(%)	(ha)	(%)	(ha)	(%)	(ha)	(%)
Áreas miscel.	2 310.04	21.56			3 137.56	7.87	6 520.99	3.99		
Clase I										
Asoc. I-II	696.42	6.50	239.86	14.16	1 914.80	4.80	4 893.56	3.00		
Clase II							485.48	0.30		
Clase III	360.72	3.37	1 053.89	62.24	2 914.68	7.31	2 087.81	1.28	1 648.06	14.48
Asoc. III-VI							578.57	0.35		
Clase IV					260.57	0.65	869.27	0.53	6 281.45	55.18
Asoc. IV-III									427.81	3.76
Asoc. IV-VI									767.25	6.74
Clase V					367.54	0.92			2 258.06	19.84
Asoc. $V_{T,E,S}-V_{T,S}$										
Clase VI	99.50	0.93	370.22	21.86	1 885.80	4.73	9 799.80	6.00		
Asoc. VI-II							2 685.46	1.64		
Asoc. VI-VII					1 760.63	4.42	11 381.33	6.97		
Clase VII	7 247.46	67.64	29.40	1.74	22 820.24	57.23	123 338.05	75.50		
Asoc. VII-V					52.80	0.13				
Asoc. VII-VI					4 760.03	11.94				
Clase VIII							720.87	0.44		
Total	10 714.15	100.00	1 693.38	100.00	39 874.65	100.00	163 361.18	100.00	11 382.63	100.00

4.3.2. Cuenca del Río Aragua

La cuenta alta y media del río Aragua se ubica en la vertiente sur de la Serranía del Litoral y, la cuenca baja, en la depresión del Lago de Valencia. Ocupa una superficie total de 398.75 km² (Figura 4-5). La clasificación de Strebin y Pérez (1974) fue revisada y actualizada por CEAEA (2005), apoyándose en la base de datos de SIACRA (2005) y SISDELAV (2005) (Figura 4-6). En esta zona predomina el relieve de elevadas pendientes por lo que la principal clase de *Capacidad de Uso* existente es la VII, con 57% de la superficie de la cuenca, siendo los principales factores generales limitantes la topografía y la erosión (Cuadro 4-2).

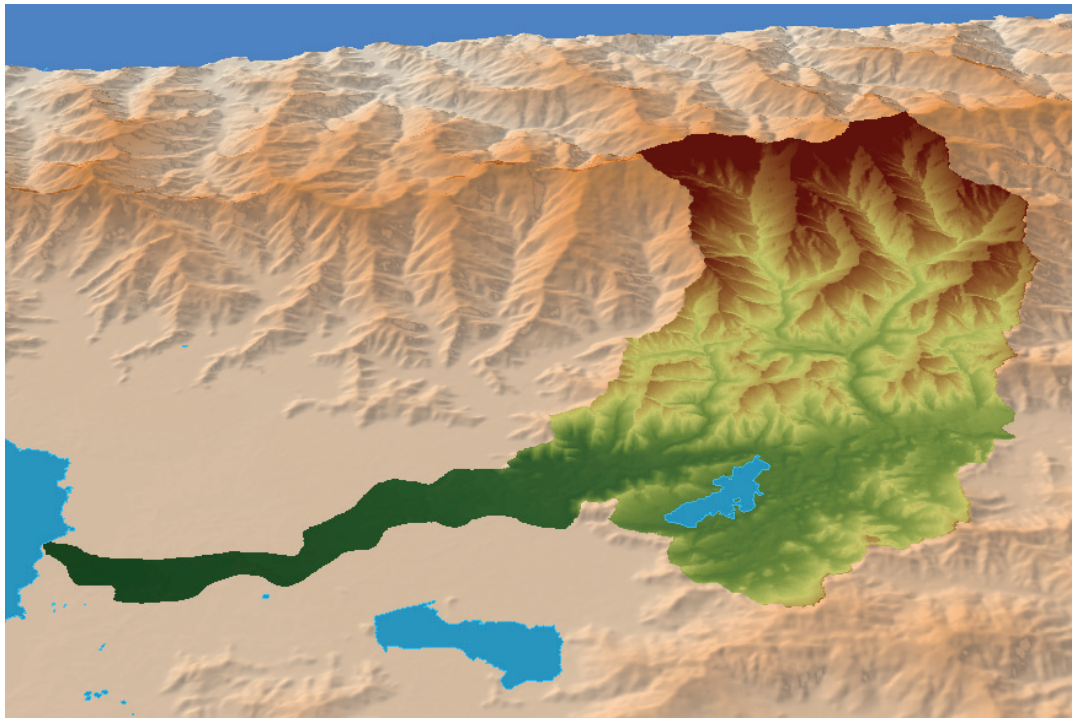


Figura 4-5. Relieve en perspectiva del área de referencia Cuenca del Río Aragua, Estado Aragua (Serranía del Litoral y Depresión del lago de Valencia).

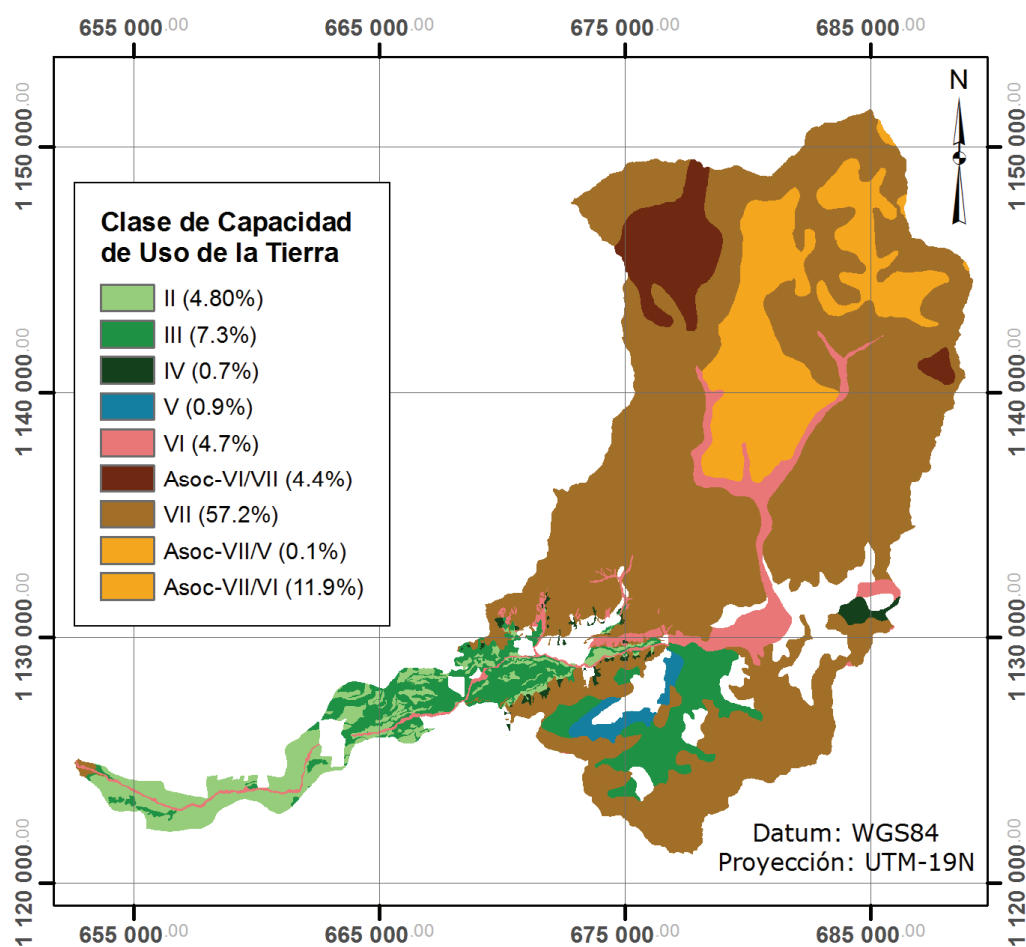


Figura 4-6. Capacidad de Uso de la Tierra en la Cuenca del Río Aragua, Estado Aragua.
Fuente: CEAEA (2005).

4.3.3. Cuenca Alta del Río Guárico

Esta cuenca se ubica en la vertiente sur de la Serranía del Interior y ocupa la mayor superficie de los sitios de muestreo seleccionados, con 1 633.61 km² (Figura 4-7). La clasificación por *Capacidad de Uso* en esta zona corresponde a la de Strebin y Pérez (1974), con las actualizaciones de Jácome et al. (2001a). También se evaluaron otras variables ambientales obtenidas del SIACARG (2005) y las metodologías de Abreu (2000), Pineda et al. (2006) y Machado et al. (2007), que contribuyen con la caracterización del área. En esta zona predomina el relieve accidentado con elevadas pendientes por lo que la principal clase de *Capacidad de Uso* existente es la VII con 75.5% de la superficie de la cuenca (Figura 4-8 y Cuadro 4-2).

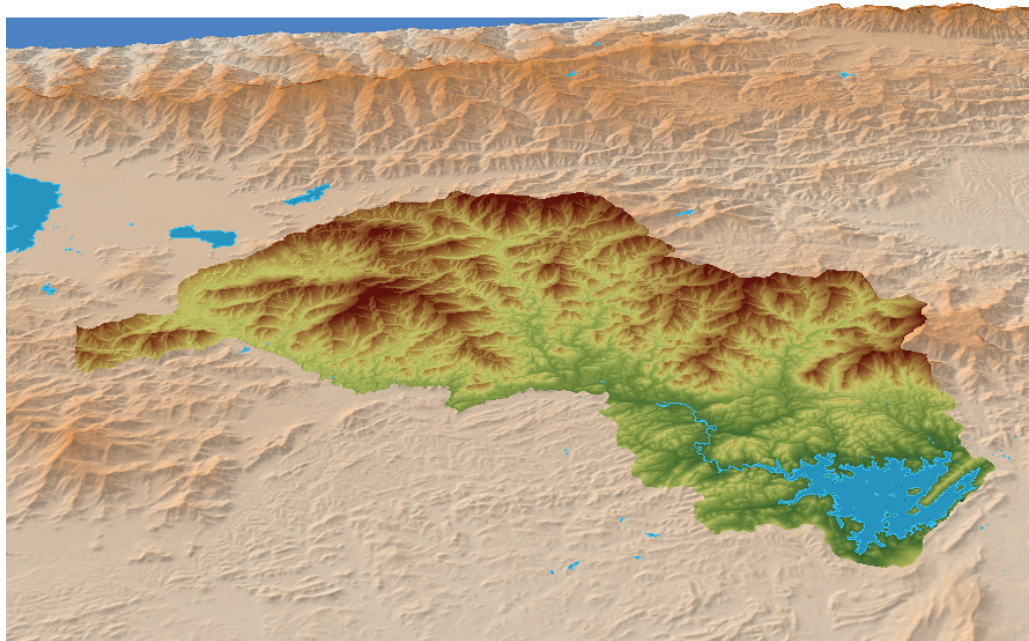


Figura 4-7. Relieve en perspectiva del área de referencia Cuenca Alta del Río Guárico, Estado Aragua (Serranía del Interior).

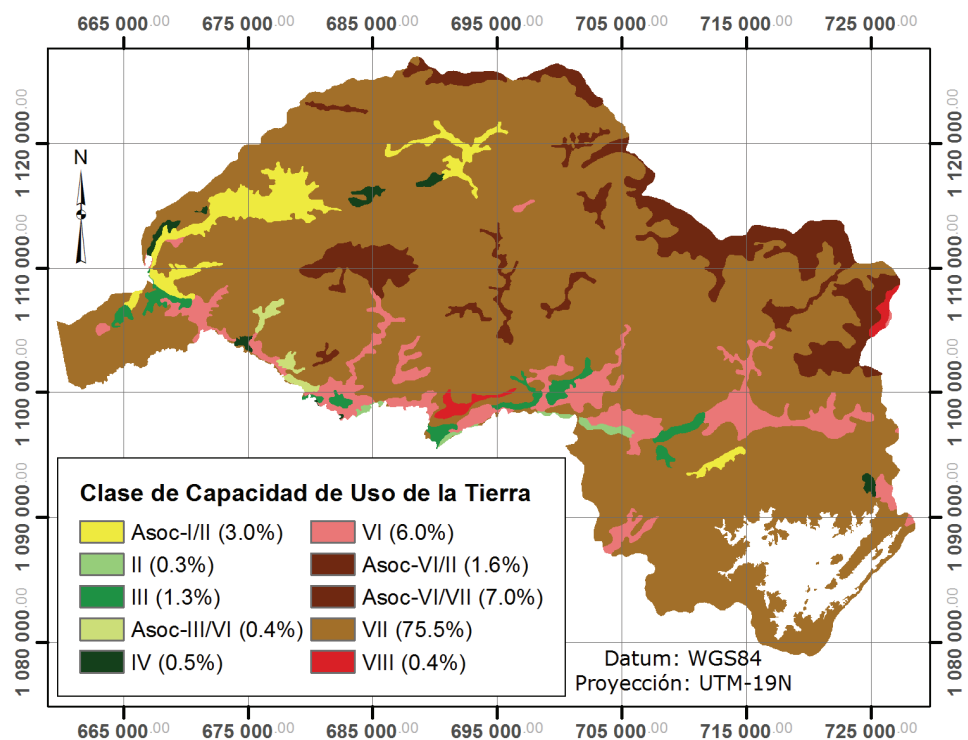


Figura 4-8. Capacidad de Uso de la Tierra en la Cuenca Alta del Río Guárico, Estado Aragua. Fuente: CEAEA (2005).

4.3.4. Sector Tocarón

Esta zona se ubica en la Depresión del Lago de Valencia, a unos cuatro km al SE del lago y ocupa una superficie de 16.93 km² (Figura 4-9). La clasificación de suelos en esta zona corresponde a la síntesis presentada por CEAEA (2005), derivada de la base de datos de SISDELAV (2005). Esta base de datos fue sistematizada por Vilorio et al. (1998) a partir de los bloques de levantamientos de suelos hechos por el MARNR en la Depresión del Lago de Valencia a fines de la década de los 70 y comienzos de los 80 (30 bloques a escala 1:25.000) y, para este sector en específico, corresponde a los trabajos de Ovalles y Zinck (1987). Los límites de las unidades de este sector fueron chequeados en campo (Apéndice 2), durante una campaña de recolección de información catastral en el marco de los trabajos realizados con la CEAEA (2005), información de utilidad para la evaluación de la metodología de valoración tributaria. En esta zona predominan los suelos clase III, con 62% de la superficie del sector (Figura 4-10 y Cuadro 4-2), siendo el principal factor general limitante el suelo.

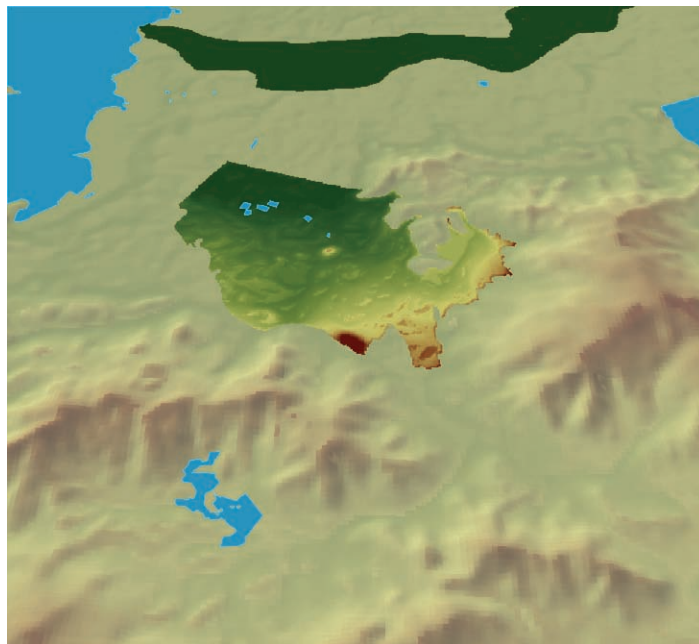


Figura 4-9. Relieve en perspectiva del área de referencia Sector Tocarón, Estado Aragua (Depresión del Lago de Valencia).

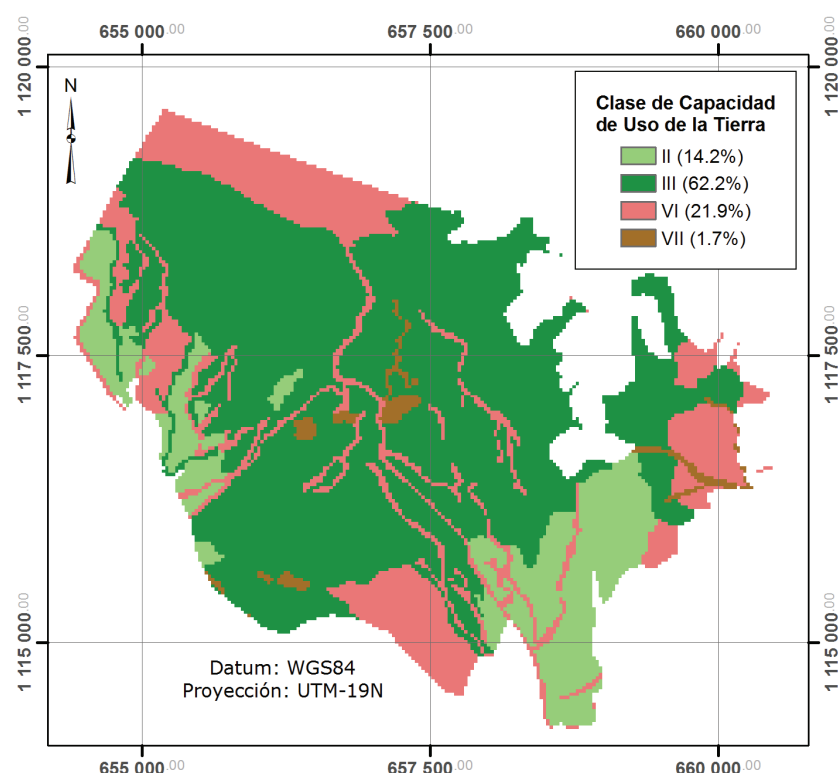


Figura 4-10. Capacidad de Uso de la Tierra en el sector Tocarón, Estado Aragua. Fuente: CEAEA (2005).

4.3.5. Sector La Peña

Este sector se ubica al sureste del Estado, en la zona eco-geográfica Llanos Centrales, ocupando una superficie de 113.83 km² (Figura 4-11). La clasificación por *Capacidad de Uso* en este sector corresponde a la presentada por CEAEA (2005), derivada del estudio elaborado por Biasino (1983). El trabajo de campo en este sector permitió chequear las clases de capacidad (Apéndice 2) y recolectar información catastral, de utilidad para la evaluación de la metodología de valoración tributaria. En esta zona predomina un relieve de ondulaciones espaciadas con pendientes locales superiores a 8%, por lo que el principal factor general limitante es la topografía, determinando que la principal clase de *Capacidad de Uso de la Tierra* existente sea la IV, con una superficie de 55% en relación al sector estudiado (Figura 4-12 y Cuadro 4-2).

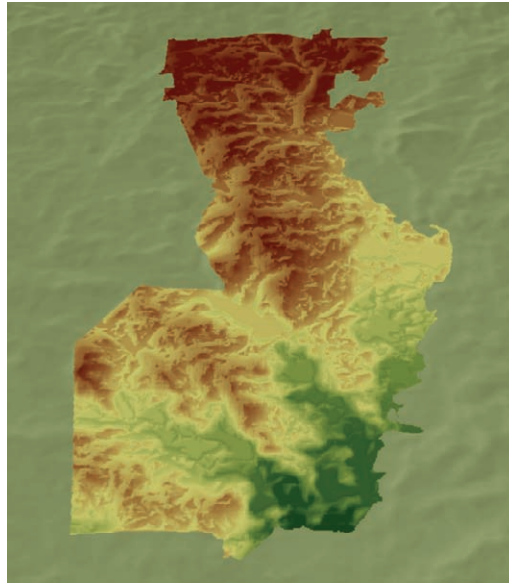


Figura 4-11. Relieve en perspectiva del área de referencia Sector La Peña, Estado Aragua (Llanos Centrales).

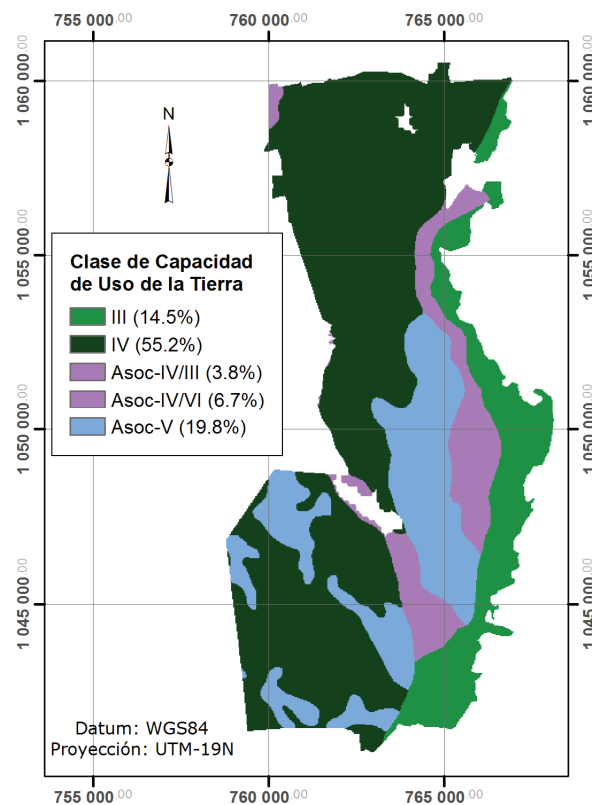


Figura 4-12. Capacidad de Uso de la Tierra en el sector La Peña, Estado Aragua. Fuente: CEAEA (2005).

4.4. SÍNTESIS

En este capítulo:

1. Se ha hecho una caracterización general del Estado Aragua-Venezuela, como área de estudio para el desarrollo de la investigación planteada en la tesis, diferenciando cinco zonas eco-geográficas: Valles Marinos de la Cordillera de la Costa, Serranía del Litoral, Serranía del Interior, Depresión del Lago de Valencia y Llanos Centrales.
2. Sobre el área de estudio se seleccionaron cinco sectores representativos de la variabilidad eco-geográfica del Estado, para recolectar, actualizar y verificar la información disponible correspondiente a la *Capacidad de Uso de la Tierra*, como variable dependiente del modelo estadístico de predicción a implementar. Los sectores seleccionados fueron: Cuenca Alta del río El Limón, en la Serranía del Litoral; Cuenca del Río Aragua, en la Serranía del Litoral y la Depresión del Lago de Valencia; Cuenca Alta del Río Guárico, en la Serranía del Interior; sector Tocarón, en la Depresión del Lago de Valencia y sector La Peñita, en los Llanos Centrales.

CAPÍTULO 5

VARIABLES INDEPENDIENTES. PREDICTORAS GEOMORFOMÉTRICAS

5.1. INTRODUCCIÓN

La metodología planteada en esta investigación, orientada a la valoración productiva y tributaria de las tierras agrícolas de Venezuela, contempla el ajuste de un modelo de regresión para la determinación de la relación existente entre la *Capacidad de Uso de la Tierra*, conocida en ciertos sectores del área de estudio, con un conjunto de variables geomorfométricas derivadas de un DEM. Las variables geomorfométricas son obtenidas por medio de diversos algoritmos de geoprocamiento desarrollados en las últimas décadas en el seno de los Sistemas de Información Geográfica (SIG). En este capítulo se estudia el fundamento conceptual de los principales algoritmos desarrollados en el campo de análisis espacial con SIG, relacionados, desde el punto de vista teórico, con el modelo pedogenético del suelo. El objetivo de este desarrollo conceptual es identificar la relación entre los procesos físicos, modelados por los algoritmos, con los procesos de formación del suelo definidos en el modelo pedogenético y que están vinculados con la *Capacidad de Uso de la Tierra*. El conocimiento de esta relación contribuirá con la selección de las variables geomorfométricas de mayor vinculación teórica con el modelo de regresión.

El objetivo del capítulo es identificar y caracterizar los algoritmos que puedan estar potencialmente relacionados, desde el punto de vista teórico, con el modelo pedogenético del suelo, en concordancia con el primer objetivo específico descrito en el Capítulo 1. La aplicación de estos algoritmos genera un conjunto global de variables que deben ser evaluadas estadísticamente, para determinar su nivel de significancia en el modelo a ajustar para el área de estudio. Este proceso permite seleccionar un subconjunto de variables que tiene validez para las características propias del área de estudio. Si se pretende aplicar la metodología de predicción en otras regiones, se deben ajustar nuevos modelos, para lo cual se puede requerir un conjunto diferente de variables geomorfométricas. Por esta razón en el capítulo se presenta el conjunto global de algoritmos, lo que proporcionará una base documental de análisis que se espera contribuya con la selección y evaluación de las variables independientes, para el ajuste del modelo en otras regiones de diferente conformación agroecológica.

5.2. VARIABLES PREDICTORAS DEL MODELO

El factor Relieve (R) en el modelo pedogenético del suelo (SCORPAN, Ecuación 2.2) es un predictor clave de las propiedades o clases de suelo, siendo el DEM la fuente de información secundaria más comúnmente usada en su predicción (Bishop et al., 2006).

McBratney et al. (2003) inventariaron las fuentes de información en estudios para la predicción de los factores del modelo SCORPAN, determinando que el DEM es la fuente principal de más del 80% de los estudios en la predicción del factor R. El DEM también se ha utilizado para la predicción de componentes del factor Clima (C) (McBratney et al., 2003; Emeis y Knoche, 2009; Machado et al., 2007; Schneider y Robbins, 2001) y del factor Organismos (O) (Jelaska, 2009; Schneider y Robbins, 2001).

El principal uso del DEM en cartografía predictiva de suelos es la extracción de variables y elementos geomorfométricos, entendiendo a las primeras como medidas descriptivas de las formas superficiales (por ejemplo, pendiente, orientación, índice topográfico de humedad) y los segundos como entidades espaciales discretas (por ejemplo, divisorias de cuencas, abanicos aluviales, red de drenaje) (Pike et al., 2009). Cada uno de estos componentes puede ser obtenido de un DEM mediante algoritmos morfométricos.

Elementos del factor Clima (C) pueden ser derivados de las relaciones entre el DEM y parámetros climáticos, registrados en estaciones del área de estudio. El factor Organismos (O) puede ser considerado a través de evaluaciones de la biomasa vegetal (con índices como el NDVI, derivado de las imágenes de satélite disponibles). Otros indicadores del factor O pudieran ser la Fracción Absorbida de Radiación Fotosintéticamente Activa (fAPAR) y el Uso Actual de la Tierra, que es una expresión de la acción antropogénica, sin embargo no hay información disponible en el área de estudio para la evaluación de estos indicadores. El factor Material Parental tampoco es considerado por falta de información edafológica y por la escala inapropiada de los estudios geológicos regionales existentes.

En los siguientes apartados se describe la relación entre las variables geomorfométricas y los procesos pedogenéticos del suelo, así como la función matemática que define las variables. Los algoritmos descritos fueron seleccionados por ser considerados en las referencias como los métodos más eficientes, por su disponibilidad en el software de análisis empleado, o por ser los más usados entre los programas SIG libres o comerciales del ámbito geomorfométrico. Pike et al. (2009) identifican tres grupos principales de variables y elementos del terreno, los cuales serán utilizados para la agrupación de las variables independientes a utilizar en el modelo de predicción de la *Capacidad de Uso*, éstos son: variables básicas, variables hidrológicas y variables topo-climatológicas.

5.3. VARIABLES Y ELEMENTOS MORFOMÉTRICOS BÁSICOS

Son aquellas que se derivan directamente del DEM, representando la forma meramente topográfica, independientemente de sus procesos formadores (Olaya, 2009). Se clasifican en locales y regionales. Los primeros se derivan de cálculos en un vecindario pequeño (por ejemplo ventanas de 3x3 ó 5x5 para el cálculo de la pendiente) y los últimos consideran totalmente el DEM o una parte importante de él (por ejemplo la delimitación de una cuenca hidrográfica). De acuerdo a Olaya (2009) el análisis de las variables locales sólo considera aspectos geométricos y topológicos, mientras que el análisis regional considera el efecto del campo gravitatorio en la geometría diferencial para convertirla en geomorfometría. En el Cuadro 5-1 se presentan las variables morfométricas básicas evaluadas para este estudio.

Cuadro 5-1. Variables geomorfométricas básicas.

Variable	Tipo	Vínculo principal con procesos relacionados con la pedogénesis
Elevación (DEM)	Básico-Local	Tasa del flujo de materia Magnitud del flujo de energía radiante Magnitud de la energía potencial gravitatoria
Pendiente (PEND, β)	Básico-Local	Tasa del flujo de materia
Orientación (ORI)	Básico-Local	Dirección general del flujo de materia Magnitud del flujo de energía radiante
Curvatura Vertical (CURV)	Básico-Local	Mecanismo de acumulación/denudación
Curvatura Horizontal (CURH)	Básico-Local	Mecanismo de acumulación/denudación Concentración/dispersión de las líneas del flujo
Curvatura General (CURG)	Básico Local	Mecanismo de acumulación/denudación Concentración/dispersión de las líneas del flujo
Índice de Convergencia (CONV)	Básico-Local	Concentración/dispersión de las líneas del flujo
Índice de Formas del Terreno (FORM)	Básico-Local	Concentración/dispersión de las líneas del flujo Mecanismo de acumulación/denudación
Dimensión Fractal (FRACT, D)	Básico-Local	Mecanismo de acumulación/denudación Características del flujo en general
Índice de Protección Morfométrica (MPI)	Básico-Local	Magnitud de la energía potencial gravitatoria Magnitud de los efectos del viento y la energía radiante
Índice de Llanura de Fondos de Valles (FONV)	Básico-Regional	Mecanismo de acumulación/denudación Mecanismo de transformación/translocación
Índice de Llanura de Cimas de Crestas (TOPCR)	Básico Regional	Mecanismo de acumulación/denudación Mecanismo de transformación/translocación

Estas variables se determinan mediante análisis matemático para lo cual se requiere definir la topografía del terreno a partir de una función matemática. Existe una gran variedad

de métodos desarrollados para el cálculo de las variables geomorfométricas a partir de la función matemática de la topografía.

5.3.1. Pendiente, Orientación y Curvatura del terreno

La evolución del suelo es determinada por procesos de ganancia, pérdida, transformación o translocación de la materia que lo compone y estos procesos tienen como fuentes de energía principal la radiación solar y la transformación de la energía potencial gravitatoria en energía cinética, ambas canalizadas o afectadas por el relieve. La pendiente del terreno está asociada al espesor del suelo, encontrándose por lo general, en una toposecuencia, suelos de menor profundidad en áreas de mayor pendiente (Elizalde et al., 2000). Igual ocurre con la fertilidad del suelo, así en una toposecuencia, los suelos de laderas con elevada pendiente son altamente lixiviados y de baja fertilidad, en contraste con los suelos de valle, en los cuales un nivel freático más alto reduce el lavado de nutrientes (Jaramillo, 2001). La erosión sobre las capas superficiales, influenciada por la elevación y la pendiente del terreno, también afecta el tiempo de evolución del suelo, por la remoción en las partes altas y deposición en las bajas que continuamente reinician el proceso pedogenético (Elizalde, et al., 2000). La orientación de la pendiente también influye en la pedogénesis ya que determina la exposición de las laderas a la radiación y a los vientos que inciden sobre la temperatura y la humedad y consecuentemente sobre la actividad biológica y sobre los procesos físico-químicos de formación del suelo (Elizalde, et al., 2000).

Suet y Luan (2004) refieren que la pendiente actúa sobre la velocidad del flujo superficial y subsuperficial y sobre la tasa de esorrentía, así como en el contenido de humedad del suelo. Por otra parte la curvatura vertical caracteriza los cambios en la velocidad del flujo y en los procesos de transporte y deposición del sedimento y la curvatura horizontal determina la propensión del agua a converger cuando fluye a través del terreno y por tanto es un indicador del contenido de agua en el suelo y de algunas características como textura, estructura, fertilidad y MO.

El algoritmo seleccionado para determinar la Pendiente, Orientación y Curvatura del terreno corresponde a la ecuación cuadrática de Zevenbergen y Thorne (1987), implementada por el SIG SEXTANTE y su fundamentación matemática se presenta en el Apéndice 3.

5.3.2. Índice de Convergencia

Este índice, propuesto por Köthe et al. (1996), se basa en la Orientación y es utilizado para distinguir áreas de flujo convergente de las divergentes en el DEM. El índice se obtiene promediando la desviación de la dirección de la pendiente de la celda central de la ventana móvil con relación a la dirección de las celdas adyacentes, y restando 90 grados. En la Figura 5-1 se detalla el procedimiento de cálculo, que corresponde a la siguiente expresión (Olaya y Conrad, 2009; Thommeret et al., 2009; Kiss, 2004):

$$CONV = \left[\left(\frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 \theta_i \right) - 90 \right] * \frac{100}{90} \quad (5.1)$$

Donde:

$CONV$ es el Índice de Convergencia,

θ_i es el ángulo de desviación entre el vector que une el centro de la celda i con el centro de la ventana móvil, hasta el vector de orientación de la celda i (va de 0° hasta 180°) (Figura 5-1).

Los posibles valores del índice varían de -100 (el flujo converge) hasta +100 (el flujo diverge). Las áreas con orientación nula son áreas planas sin curvatura ($CONV=0$). Este algoritmo es implementado por el SIG SEXTANTE.

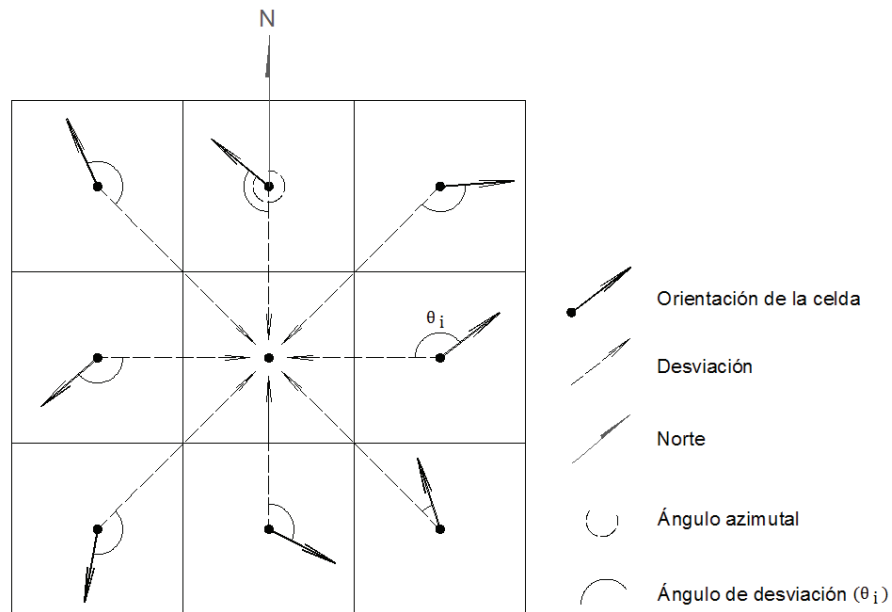


Figura 5- 1. Cálculo del Índice de Convergencia. Adaptado de Thommeret et al. (2009).

5.3.3. Dimensión Fractal

La topografía tiene propiedad fractal y ésta puede ser medida por la dimensión fractal (Hengl y Evans, 2009). En geometría Euclidiana la línea recta tiene una dimensión de uno, la superficie de dos y el volumen de tres. Pueden haber dimensiones fraccionarias entre estos valores, lo que indica que la dimensión no es entera, sino real (Chuvieco, 2002), como ocurre con la línea recta cuando se quiebra. A medida que la línea se hace más compleja, va ocupando un área mayor (una banda) hasta llenar completamente el espacio bidimensional y alcanzar una dimensión fraccional de 2.0. La línea o la superficie también tienen la propiedad de autosimilitud, según la cual en todas las escalas siguen manteniendo la misma complejidad (o rugosidad) y siguen siendo estadísticamente similares.

El fractal es un objeto geométrico que exhibe las propiedades de dimensión fraccionaria y autosimilitud. La dimensión fractal de un objeto geométrico de longitud uno (1), que es dividido en N partes, se expresa como:

$$N_L * L^D = 1 \quad (5.2)$$

Expresada en términos de *FRACT*:

$$D = \frac{\ln(N_L)}{\ln(\frac{1}{L})} \quad (5.3)$$

Donde:

N_L es el número de unidades o elementos de longitud L que componen el objeto geométrico,

L es la longitud de la unidad o elemento componente del objeto geométrico,

D es la dimensión fractal del objeto geométrico.

La superficie topográfica es un fractal natural y la medición de su dimensión fractal puede ser usada para evaluar o simular su rugosidad. De acuerdo a Eastman (2006) la topografía, como muchos objetos geográficos no es perfectamente fractal, experimentando cambios agudos en la dimensionalidad fraccional a medida que se producen cambios en los procesos geomorfológicos subyacentes. Con base a ello, este autor propone una técnica que considera cada segmento de la pendiente para obtener la evidencia de angulosidad que

origina la forma fractal. El procedimiento se basa en un algoritmo desarrollado para medir la dimensión fractal a partir de la pendiente, calculada sobre líneas cartográficas digitalizadas (Eastman, 2006), e implementado por el SIG IDRISI:

$$D = \frac{\ln(2)}{\ln(2) + \ln\left(\sin\left(\frac{180 - \beta}{2}\right)\right)} \quad (5.4)$$

Donde:

β es la pendiente del terreno (°).

Las superficies con alto valor de la dimensión fractal son más complejas que las de bajo valor, lo que es un indicador de su rugosidad u ondulación (Olaya, 2009). Según Hofierka et al. (2009) la mayoría de las superficies topográficas tienen una dimensión fractal que varía entre 2.2 y 2.6, aunque ésta no es simple y varía con la escala.

La geometría fractal se ha utilizado para el análisis de paisajes en imágenes Landsat (Lam, 1990), inventario forestal (Drake y Weishampel, 2000), detección de líneas de falla y otras estructuras geológicas en imágenes de sensores remotos (Gloaguen et al., 2007), clasificación de la cobertura en imágenes de radar (Vinluam et al., 1997), morfometría de lagos (Castillo del, 1992).

5.3.4. Índice de Llanura de Fondos de Valles y de Cimas de Crestas

Gallant y Dowling (2003) desarrollaron un índice multiresolución para determinar el grado de llanura en los fondos de los valles, como un primer paso en la caracterización de áreas deposicionales. Complementariamente incorporaron un índice separado para determinar la llanura de las cimas de las crestas o filas. El índice permite representar los fondos de valle como regiones continuas, en conformidad con los mapas geomorfológicos, y a diferencia con la variabilidad granular que sufren los mapas de pendiente. Los autores destacan el potencial del índice para evaluar las propiedades del regolito, permitiendo establecer relaciones cuantitativas con su espesor, dada la profunda deposición en los amplios valles planos, así como con su textura. También encontraron una estrecha relación entre los patrones del índice y las unidades geomorfológicas identificadas en el cartografiado de la relación suelo-paisaje, recomendando su uso para inferir una variación espacial más detallada en el proceso pedogenético y, de aquí, patrones de propiedades del suelo.

En el Apéndice 4 se presenta una síntesis del desarrollo matemático del algoritmo, el cual es implementado en el SIG SAGA.

5.3.5. Índice de Protección Morfométrica

Este índice determina el grado de protección o resguardo que la configuración geomorfométrica del terreno le proporciona a una celda determinada (Olaya, 2006). El índice fue desarrollado para evaluar la protección del hábitat de aves a los efectos del viento y se basa en la altitud, la pendiente y la orientación de una celda con sus vecinas en un radio dado (Jenness, 2007), de acuerdo a la expresión:

$$MPI = \frac{\sum_{j=1}^8 MAX\left(\frac{\beta_{i,j}}{DH_{i,j}}\right)}{8} \quad (5.5)$$

Donde:

- MPI es el Índice de Protección promedio de la celda central de una ventana móvil de radio dado,
- j son las direcciones de cálculo orientadas hacia el centro de cada una de las 8 celdas vecinas,
- i es cada una de las celdas ubicadas en la dirección j para el cálculo de β y DH . Se calcula hasta la celda ubicada a la distancia correspondiente al radio de búsqueda especificado,
- $\beta_{i,j}$ es el gradiente de la Pendiente ($^{\circ}$) entre la celda central y la celda i en la dirección j ,
- $DH_{i,j}$ es la Distancia Horizontal (m) entre la celda central y la celda i en la dirección j .

Un mayor valor del índice indica un mayor grado de protección o resguardo de la celda. Esta variable puede ser un indicador de zonas afectadas por desprendimientos de masa o expuestas a los efectos de la erosión eólica, por lo que se puede emplear como un estimador de procesos de formación del suelo. Este algoritmo es implementado por el SIG SEXTANTE.

5.4. VARIABLES Y ELEMENTOS ESPECÍFICOS DE LA HIDROLOGÍA

Las variables hidrológicas reflejan el movimiento potencial de la materia sobre la topografía (Pike et al., 2009). Las variables consideradas, sintetizadas en el Cuadro 5-2, se describen a continuación:

Cuadro 5-2. Variables geomorfométricas específicas de la hidrología.

Variable	Vínculo principal con procesos relacionados con la pedogénesis
Acumulación de Flujo (ACU)	Magnitud del flujo de materia
Longitud de Vías de Flujo (LONF)	Características del flujo en general Tiempo de concentración del flujo
Longitud de la Pendiente (LONP)	Características del flujo en ladera Mecanismo de acumulación/denudación
Distancia natural a la red de drenaje (DISNR)	Características del flujo en ladera Mecanismo de acumulación/denudación
Distancia horizontal a la red de drenaje (DISHR)	Características del flujo en ladera Mecanismo de acumulación/denudación
Distancia vertical a la red de drenaje (DISVR)	Características del flujo en ladera Mecanismo de acumulación/denudación
Elevación promedio aguas arriba (ALTA)	Tasa del flujo de materia Magnitud del flujo de energía radiante Magnitud de la energía potencial gravitatoria
Pendiente promedio aguas arriba (PENDA)	Tasa del flujo de materia
Orientación promedio aguas arriba (ORIA)	Dirección general del flujo de materia Magnitud del flujo de energía radiante
Ancho del flujo (ANCHF)	Características del flujo en general Mecanismo de acumulación/denudación
Índice Topográfico de Humedad (TWI)	Características del flujo en general Tasa del flujo de materia Mecanismo de transformación/translocación
Índice de Potencia de Flujo (SPI)	Tasa del flujo de materia Mecanismo de acumulación/denudación
Índice de Transporte de Sedimentos (STI)	Tasa del flujo de materia Magnitud del flujo de materia Mecanismo de acumulación/denudación
Balance Neto (BALN)	Magnitud del flujo de materia Mecanismo de acumulación/denudación
Índice de Balance de Masas (IBM)	Magnitud del flujo de materia Mecanismo de acumulación/denudación

5.4.1. Algoritmos de Flujo

El flujo de material por el efecto gravitacional y los procesos meteorológicos sobre la superficie del terreno se determinan por la dirección de la máxima pendiente en las laderas en descenso. Se han desarrollado varios algoritmos para el cálculo de estas vías en las que se moviliza la masa, el volumen o la lámina de material transportado (agua, nieve, sedimentos). Algunos de estos algoritmos son unidimensionales, es decir, el flujo se mueve del centro de

una celda al centro de sólo una de las celdas circundantes, tal como los métodos “Deterministic 8 – D8” (O’Callaghan y Mark, 1984) y “Random D8 – Rho8” (Fairfield y Leymarie, 1991). Otros algoritmos son conceptualmente bidimensionales, al permitir el flujo de una celda a más de una de sus vecinas, entre éstos el “Deterministic Infinity - $D\infty$ ” (Tarboton, 1997), “Multi Flow Direction – MFD” o “FD8” (Quinn et al., 1991; Freeman, 1991); “DEMON” (Costa-Cabral y Burges, 1994) y “Mass-Flux Method – MFM” (Gruber y Peckham, 2009).

El método MFD divide el flujo que sale de una celda entre las celdas vecinas ubicadas en posición más baja. Su formula general viene dada por la siguiente expresión (Gruber y Peckham, 2009; Desmet y Govers, 1996; Freeman, 1991).

$$d_i = \frac{(\tan\beta_i)^\gamma}{\sum_{j=1}^k (\tan\beta_j)^\gamma} \quad (5.6)$$

Donde:

- d_i es la fracción que drena hacia la celda vecina i (la sumatoria de los valores de d_i de las 8 celdas de la ventana móvil debe ser igual a 1, para conservar la masa),
- i, j son las direcciones de flujo (1 a 8),
- $\tan\beta_i$ es el gradiente de la Pendiente entre la celda central y la celda en dirección i,
- $\sum_{j=1}^k$ es la sumatoria del valor de Pendiente de todos los vecinos de menor altitud. Las celdas más altas tienen valor 0 y en una ventana móvil de 3x3 el número de celdas vecinas (k) es igual a ocho,
- γ es el coeficiente de dispersión. La celda central de la ventana móvil recibe un flujo que es transferido sólo a las celdas vecinas que se encuentran en posición más baja, en una fracción para cada una que es proporcional a la Pendiente de las celdas y que es afectada por un exponente γ que controla la dispersión. Altos valores de γ concentran el flujo en la dirección de mayor pendiente y bajos valores aumentan la dispersión. De acuerdo a Gruber y Peckham (2009) γ debe ser mayor que 0 y puede variar entre 4 y 6, pero Freeman (1991) propone un valor de 1.1.

El producto de los algoritmos de flujo es una capa con topología explícita que es útil para extraer del DEM otras variables y elementos relativos a la hidrología, dada la definición de la conectividad entre todas las celdas (Burrough y McDonnell, 2005).

5.4.2. Longitud de las Vías de Flujo

Esta variable tiene relación con la tasa de erosión del suelo, la producción de sedimentos y el tiempo de concentración del flujo (Suet y Luan, 2004). Representa la distancia total de flujo que se calcula desde las celdas de origen hasta la celda de interés (centro de la ventana móvil) situada aguas abajo. Las celdas de origen pueden ser puntos expresamente indicados, como por ejemplo las cabeceras de origen de la red de drenaje derivadas de un mapa topográfico convencional o, alternatively, las líneas de cresta o cumbres, donde comienza el área de captación, identificadas en el DEM.

El cálculo se realiza con alguno de los algoritmos de flujo, como el indicado en la Ecuación 5.6. La longitud del flujo que llega desde aguas arriba a la celda de interés se totaliza con la siguiente expresión:

$$L_i = L + \sum_{i=1}^k (L_{d_i} d_i) \quad (5.7)$$

Donde:

L_i es el valor de la longitud acumulada de flujo para la celda i ,

L es el valor de la longitud de la celda central (proveniente del cálculo de L_i en la ventana móvil previa),

L_{d_i} es el valor de la longitud de la celda vecina i que se encuentra aguas abajo de la celda central,

$L_{d_i} = 1 * \text{Resolución de la celda}$, para la dirección N-S y E-O,

$L_{d_i} = \sqrt{2} * \text{Resolución de la celda}$, para la dirección diagonal,

d_i es la fracción de flujo obtenida con la Ecuación 5.6.

5.4.3. Longitud de Pendientes

Esta variable corresponde a la distancia de flujo en laderas, relacionada con el factor L en la ecuación USLE (Wischmeier y Smith, 1978) de pérdidas de suelo. Tiene incidencia en los fenómenos de erosión/sedimentación y en la pedogénesis local. El cálculo es similar al de

la Longitud de las Vías de Flujo (Ecuación 5.7), pero en este caso la sumatoria de longitudes de flujo se detiene cuando hay un cambio de pendiente pronunciado que indica el fin de un tramo de ladera y el reinicio del cálculo para otro tramo (Olaya, 2006).

5.4.4. Acumulación de Flujo

La acumulación de flujo, área aportante o área de captación es la superficie que, situada aguas arriba de un punto de interés, recolecta todo el flujo que recibe y lo transita por dicho punto. Es una superficie proyectada sobre el plano horizontal y en un mapa raster se obtiene sumando todas las celdas que contribuyen con flujo a la celda de interés, situada aguas abajo, y multiplicando por la superficie de cada celda. Los algoritmos de flujo señalados anteriormente permiten calcular esta variable. La Ecuación 5.6, correspondiente al método MFD (Freeman, 1991), permite obtener directamente el área de captación, de acuerdo a la siguiente expresión:

$$ACU_i = A + \sum_{i=1}^k (A_{d_i} d_i) \quad (5.8)$$

Donde:

ACU_i es el área de captación acumulada para la celda central i ,

A es el área de captación de la celda central (proveniente del cálculo de ACU_i en la ventana móvil previa),

A_{d_i} es el área de captación de la celda vecina i ubicada aguas abajo de la celda central,

d_i es la fracción de flujo obtenida con la Ecuación 5.6.

La acumulación de flujo es utilizada para derivar otras variables de índole hidrológica, como la red de drenaje o índices compuestos como el Índice Topográfico de Humedad, aunque también permite calcular balances de masa si se sustituye la elevación del DEM por otros parámetros de masa como precipitación, infiltración, intercepción y evaporación (Burrough y McDonnell, 2005), o las descargas anuales y picos de precipitación (Gruber y Peckham, 2009). Además permite hacer inferencias generales acerca de la estabilidad de la escorrentía, la producción de sedimentos, el contenido de humedad del suelo y sus características (Suet y Luan, 2004).

5.4.5. Índice Topográfico de Humedad (TWI)

Es una variable que define la tendencia de una celda a acumular agua (Gruber y Peckham, 2009). Está relacionada con la humedad del suelo y refleja la tendencia de éste a generar escorrentía, ya que áreas con mayor valor del índice, como producto de su configuración topográfica y edáfica, son más proclives a generar escorrentía derivada de la precipitación (Abarca y Bernabé, 2008a; Olaya, 2006). Este índice se calcula mediante la siguiente expresión (Beven y Kirkby, 1979):

$$TWI_i = Ln \left[\frac{ACU_i}{\tan(\beta_i)} \right] \quad (5.9)$$

Donde:

ACU_i es la Acumulación de Flujo en la celda i (Ecuación 5.8),

β_i es la pendiente local en la celda i .

5.4.6. Índice de Potencia de Flujo (SPI)

Esta variable es indicadora de la capacidad del cauce (o de la celda) de producir erosión. Viene dado por la expresión (Moore et al., 1993):

$$SPI_i = ACU_i * \tan(\beta_i) \quad (5.10)$$

A medida que se incrementa el área de captación y la magnitud de la pendiente, también se incrementa el flujo, la velocidad y la energía del flujo y consecuentemente su potencial de producir erosión.

5.4.7. Índice de Transporte de Sedimentos (STI)

Esta variable caracteriza el proceso de erosión y sedimentación, en particular el efecto de la topografía sobre la pérdida de suelo (Burrough y McDonnell, 2005). Es equivalente al factor LS (Longitud-Pendiente) de la ecuación USLE (Wischmeier y Smith, 1978) pero aplicable en superficies tridimensionales, ya que sustituye la longitud unidimensional de la pendiente por el área de captación bidimensional. Se calcula mediante la siguiente expresión (Mitasova y Mitas, 2001):

$$STI_i = \left(\frac{ACU_i}{22.13} \right)^m \left(\frac{\sin \beta_i}{0.0896} \right)^n \quad (5.11)$$

Donde:

- ACU_i es el área de aportación aguas arriba por unidad de ancho,
22.13 es la longitud de ladera de aportación estándar de acuerdo a la USLE,
0.0896 es la pendiente de la ladera estándar (USLE),
 m depende del tipo prevalente de erosión y varía entre 0.4 y 0.6,
 n depende del tipo prevalente de erosión y varía entre 1.0 y 1.3.

5.4.8. Balance Neto

Esta variable hace uso de un algoritmo de flujo (D8, D ∞ , MFD) para calcular el flujo de material que entra y sale de cada celda (Olaya, 2006). Conociendo las proporciones de flujo, obtenidas, por ejemplo, con la Ecuación 5.6, y utilizando una capa como la tasa de erosión del suelo, el STI, o alguno de los componentes del modelo de erosión USLE, como el factor LS, se puede conocer la cantidad de sedimentos que entra a la celda central de la ventana móvil y la cantidad que la propia celda desplaza hacia las vecinas aguas abajo. La diferencia entre los valores de entrada y salida en cada celda es el balance neto de sedimentación. Valores mayores a cero indican ganancia de sedimentos y valores menores a cero, pérdida de sedimentos.

5.4.9. Ancho de Flujo

Esta variable se refiere a la longitud efectiva del contorno del flujo en dirección ortogonal a la salida del flujo (Gruber y Peckham, 2009). Además de su importancia en la hidrología, para la caracterización de parámetros de flujo, puede ser un indicador de cauces, planicies y terrazas aluviales, determinantes en los factores formadores del suelo. De acuerdo a Gruber y Peckham (2009) para algoritmos de flujo de vecinos múltiples con un ángulo de flujo único, el ancho del pixel de flujo se calcula como:

$$ANCHF = |\sin \theta| * \Delta x + |\cos \theta| * \Delta y \quad (5.12)$$

Donde:

- $ANCHF$ es la longitud ortogonal del flujo de salida,
 θ es el ángulo de orientación,
 $\Delta x, \Delta y$ es el tamaño de las celdas en el eje de coordenadas.

5.5. VARIABLES Y ELEMENTOS ESPECÍFICOS DE LA TOPO-CLIMATOLOGÍA

Las variables topo-climáticas son aquellas que se derivan de la relación entre la topografía y los parámetros climáticos y meteorológicos. En el Cuadro 5-3 se presenta una síntesis del efecto general de las variables topo-climáticas sobre los procesos pedogenéticos y a continuación se presenta su descripción.

Cuadro 5-3. Variables geomorfométricas específicas de la topo-climatología.

Variable	Vínculo principal con procesos relacionados con la pedogénesis
Radiación Solar (RAD)	Tasa del flujo de energía Mecanismo de transformación/translocación Desarrollo de Organismos
Duración Radiación Solar (DURAD)	Tasa del flujo de energía Mecanismo de transformación/translocación Desarrollo de Organismos
Calor Anisotrópico Diurno (CALD)	Magnitud del flujo de energía Mecanismo de transformación/translocación Desarrollo de Organismos
Precipitación anual (PRE)	Tasa del flujo de materia Mecanismo de transformación/translocación Desarrollo de Organismos
Temperatura anual (TEM)	Magnitud del flujo de energía Mecanismo de transformación/translocación Desarrollo de Organismos
Evaporación anual (EVA)	Tasa del flujo de materia Mecanismo de transformación/translocación Desarrollo de Organismos
Evapotranspiración anual (ETP, ETR)	Tasa del flujo de materia Mecanismo de transformación/translocación Desarrollo de Organismos
Déficit Anual de Humedad del Suelo (DEF)	Magnitud del flujo de materia Mecanismo de transformación/translocación Desarrollo de Organismos
Excedente Anual de Humedad del Suelo (EXC)	Magnitud del flujo de materia Mecanismo de transformación/translocación Desarrollo de Organismos
Almacenamiento Anual de Humedad del Suelo (ALM)	Mecanismo de transformación/translocación Desarrollo de Organismos
Índice Normalizado de Vegetación (NDVI)	Mecanismo de transformación/translocación Tasa del flujo de materia y energía Desarrollo de Organismos

5.5.1. Radiación solar potencial

Esta variable afecta la mayor parte de los procesos hidrológicos y biofísicos de la superficie terrestre, influyendo sobre elementos como la temperatura y la humedad del suelo, que son determinantes en el desarrollo de la actividad biológica y de los procesos físico-químicos que actúan permanentemente sobre la pedogénesis edáfica.

Cuando no existen datos provenientes de mediciones con estaciones piranométricas, ni de variables climatológicas como la temperatura del aire, precipitación, humedad relativa o nubosidad, no se pueden hacer estimaciones directas de la radiación solar real incidente, sin embargo se pueden hacer cálculos de la radiación solar potencial, para aplicaciones ecológicas, tomando en consideración los efectos de la posición de la Tierra con relación al Sol y la influencia de la topografía.

En el Apéndice 5 se describe el procedimiento desarrollado por AntoniĆ (1998), AntoniĆ et al. (2000) y Böhner y AntoniĆ (2009) para el cálculo de la radiación solar potencial que incide sobre el terreno y el cual fue utilizado en el presente estudio, mediante la implementación del SIG SAGA.

5.5.2. Calor anisotrópico diurno

Los cambios en la exposición a la radiación solar, a causa de la orientación de las laderas, producen cambios en el intercambio de calor y humedad y consecuentemente en el contenido de humedad del suelo, la fenología y fisonomía de las plantas y en el patrón de distribución de tipos de suelo (Böhner y AntoniĆ, 2009; Böhner y Selige, 2006). Estos cambios son apreciables entre las laderas orientadas al norte y al sur en latitudes medias y altas. Sin embargo, aun con una distribución simétrica de la radiación, con una radiación total similar en las caras este y oeste del relieve, como ocurre en el trópico cercano al Ecuador, en todas las latitudes el cambio diurno en la Razón de Bowen¹ produce un excedente relativo de calor en las laderas orientadas al oeste. El excedente se produce porque en horas de la mañana (Sol en el este), cuando el suelo todavía se encuentra húmedo, hay una más alta proporción de flujo de calor latente, mientras que en horas de la tarde (sol en el oeste) hay un incremento en la transferencia de calor sensible.

Estos cambios en el calor diurno pueden ser aproximados con la siguiente expresión (Böhner y AntoniĆ, 2009), implementada por SAGA:

¹ Razón entre el flujo de calor sensible y el flujo de calor latente sobre una superficie.

$$CALD_{\alpha} = \cos(\alpha_{max} - \alpha) * \arctan(\beta) \quad (5.13)$$

Donde:

$CALD_{\alpha}$ es el calor anisotrópico diurno,

α_{max} es la orientación con la que se produce el máximo excedente de calor total.
Se puede adoptar la orientación del Sol después del mediodía solar, a la hora que produce el máximo calentamiento del aire.

5.5.3. Balance hídrico del suelo

La precipitación y la temperatura son los componentes climáticos que tienen mayor incidencia en la evolución del suelo (Jaramillo, 2001). El viento también influye en la pedogénesis por su acción en los procesos de evaporación y en el transporte de partículas por erosión eólica. Estos tres elementos participan, en mayor o menor medida, en la evapotranspiración, que determina la cantidad de agua necesaria (evapotranspiración potencial) y disponible (evapotranspiración real) para suplir la demanda transpirativa de las plantas y de la evaporación atmosférica.

Suplidas las demandas consuntivas de la evapotranspiración, el agua que queda disponible, proveniente de la precipitación y otras fuentes, es la que participa en los procesos físicos, químicos y biológicos que contribuyen con la pedogénesis.

Además de la magnitud de la precipitación, su distribución en el tiempo, con los efectos sobre el balance hídrico y el ciclo de vida de los organismos, determina procesos formadores como la estructuración del suelo (Figura 5-2).

La importancia de la temperatura en el proceso de pedogénesis se deriva de su influencia en el resultado del balance hídrico del suelo, ya que la evapotranspiración varía en proporción directa con la temperatura. A mayor temperatura, mayor demanda evapotranspirativa, mayor déficit hídrico en el suelo y menor disponibilidad de agua para los procesos pedogenéticos, en igualdad de condiciones de precipitación y de los demás factores formadores del suelo. La temperatura también incide en la intensidad de las reacciones químicas y en la velocidad de los procesos bioquímicos y biológicos (Elizalde et al., 2000).

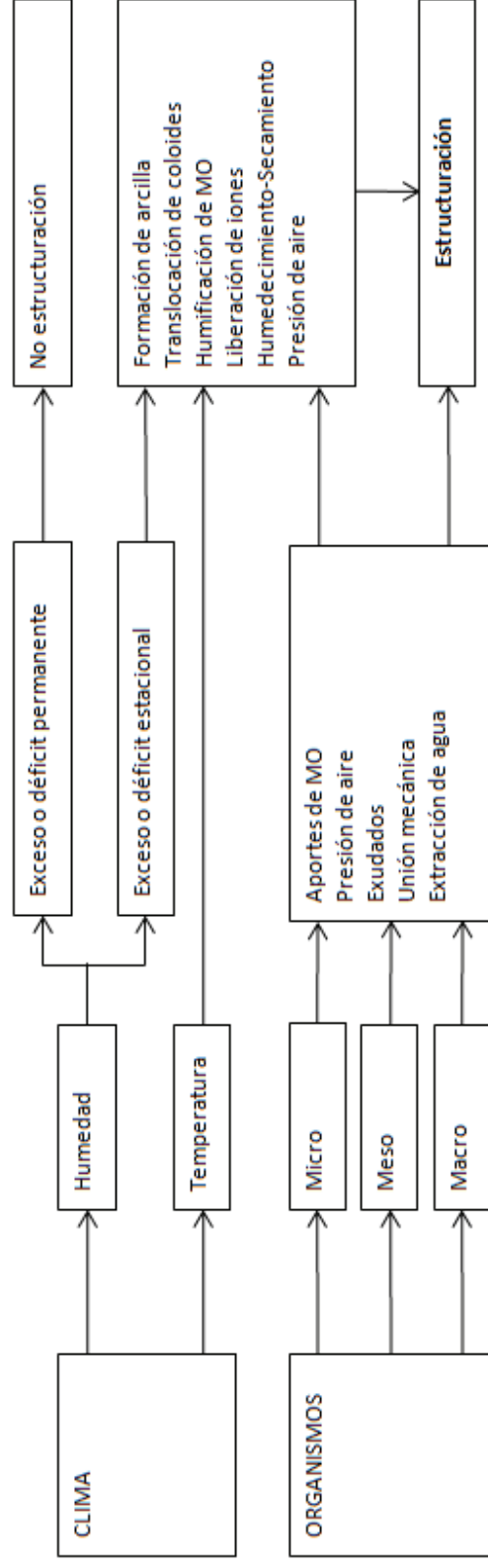


Figura 5- 2. Participación de los factores formadores Clima y Organismos en el proceso pedogenético de estructuración del suelo. Fuente: Adaptado de Jaramillo (2001).

La distribución espacial de la precipitación, como fuente de agua, y de la evapotranspiración, como demanda de la vegetación y de la atmosfera, permiten evaluar en el tiempo la distribución potencial de los déficit y excedentes de humedad en el suelo, si se conoce su capacidad de almacenamiento en el espacio tridimensional y se simplifican otros aportes y pérdidas, como las aguas superficiales y subterráneas afluentes y efluentes y la percolación profunda.

Los elementos del balance hídrico, como precipitación efectiva, evapotranspiración, déficit y excedentes y el almacenamiento de humedad del suelo, son componentes del factor clima que tienen participación activa en el proceso de formación del suelo y por lo tanto están correlacionados con su capacidad productiva.

En áreas con escasa información edafoclimática e hidrológica se puede obtener una aproximación a la distribución espacial de los déficits y excedentes de agua en el suelo, asumiendo las siguientes simplificaciones:

- La variabilidad espacial del suelo se puede representar con un valor empírico de capacidad de almacenamiento que equivalga al valor promedio de toda la zona en estudio. Los suelos de la Serranía del Litoral y de la Serranía del Interior, incluyendo solum y horizontes saprolíticos subyacentes, alcanzan frecuentemente los 100-150 cm de espesor. En los Valles Marinos de la Cordillera de la Costa, en la Depresión del lago de Valencia y en los Llanos Centrales la profundidad de los suelos es mayor (Sucre, 2003). Adoptando un valor promedio de profundidad radicular efectiva de 50 cm, con texturas variables entre Franco-Arenosas, Francas y Franco-Arcillosas, se puede asumir una tensión de retención a Capacidad de Campo de 30% del contenido volumétrico de agua en el suelo (15 cm) y una tensión de retención a Punto de Marchitez Permanente de 10% (5 cm) (Grassi, 2000), con lo que un valor de 10 cm se puede considerar adecuado como capacidad máxima de almacenamiento de humedad, ante la falta de información distribuida de este parámetro.
- No se consideran los aportes y pérdidas por percolación profunda, flujos superficiales y subterráneos, trasvases, obras de captación, etc.
- Dado que la precipitación promedio mensual más baja del registro histórico disponible corresponde al mes de marzo (18,1 mm), se asume que en ese mes el almacenamiento de humedad en el suelo es cero y se comienza el cálculo del balance en el mes de abril.

El procedimiento de cálculo se basa en el siguiente algoritmo:

$$DISP_{(i)} = PRE_{(i)} + ALM_{(i-1)} - ETP_{(i)} \quad (5.14)$$

Si: $0 \leq DISP_{(i)} \leq TOPE$, entonces:

$$ETR_{(i)} = ETP_{(i)} \quad (5.15)$$

$$ALM_{(i)} = DISP_{(i)} - ETR_{(i)} \quad (5.16)$$

$$DEF_{(i)} = 0 \quad (5.17)$$

$$EXC_{(i)} = 0 \quad (5.18)$$

Si: $DISP_{(i)} < 0$, entonces:

$$ETR_i = PRE_{(i)} + ALM_{(i-1)} \quad (5.19)$$

$$ALM_{(i)} = 0 \quad (5.20)$$

$$DEF_{(i)} = ETP_{(i)} - ETR_{(i)} \quad (5.21)$$

$$EXC_{(i)} = 0 \quad (5.22)$$

Si: $DISP_{(i)} > TOPE$, entonces:

$$ETR_{(i)} = ETP_{(i)} \quad (5.23)$$

$$ALM_{(i)} = TOPE \quad (5.24)$$

$$EXC_{(i)} = DISP_{(i)} - ALM_{(i)} \quad (5.25)$$

$$DEF_{(i)} = 0 \quad (5.26)$$

Donde:

- $DISP_{(i)}$ es la disponibilidad de agua total promedio en el mes i ,
- $PRE_{(i)}$ es la precipitación promedio del mes i ,
- $ALM_{(i)}$ es el almacenamiento promedio de agua en el suelo durante el mes i ,
- $ETP_{(i)}$ es la evapotranspiración potencial promedio del mes i ,
- $ETR_{(i)}$ es la evapotranspiración real promedio del mes i ,
- $DEF_{(i)}$ es el déficit de humedad promedio en el suelo durante el mes i ,
- $EXC_{(i)}$ es el excedente de humedad promedio en el suelo durante el mes i .

El balance debe cumplir que:

$$\sum_{i=1}^{12} DEF_{(i)} = \sum_{i=1}^{12} ETP_{(i)} - \sum_{i=1}^{12} ETR_{(i)} \quad (5.27)$$

$$\sum_{i=1}^{12} EXC_{(i)} = \sum_{i=1}^{12} PRE_{(i)} - \sum_{i=1}^{12} ETR_{(i)} \quad (5.28)$$

5.5.4. Índice de vegetación

El suelo es habitado por gran cantidad de los organismos conocidos, siendo los vegetales los de mayor influencia en la pedogénesis ya que controlan la cantidad y tipo de materia orgánica (MO) aportada (Jaramillo, 2001). Los microorganismos (tamaño menor a 200 μm) como las bacterias, hongos, algas y protozoarios, requieren para su desarrollo condiciones ambientales específicas de humedad, temperatura, pH, sustrato orgánico, luz y sales. Si estas condiciones son adecuadas se favorece la actividad de los organismos en el proceso de formación del suelo, las cuales incluyen reacciones químicas de transformación de minerales, descomposición de MO, fijación de nitrógeno atmosférico, colonización del material parental, formación y estabilización de la estructura del suelo. Los mesoorganismos (tamaño entre 200 μm y 6 mm) conformados principalmente por anélidos, artrópodos, nematodos y moluscos, participan en la fragmentación, transformación, translocación y aporte de materiales orgánicos, además de modificar las propiedades físicas del suelo. Al igual que los microorganismos, su desarrollo se ve favorecido en condiciones ambientales adecuadas. Los macroorganismos (tamaño superior a 6 mm) incluido el ser humano, contribuyen igualmente con la transformación, translocación y aporte de MO, el reciclaje de nutrientes y la modificación del espacio poroso del suelo.

Las condiciones ambientales sobre las que se desarrollan los organismos del suelo son derivadas principalmente de elementos del factor clima, como la temperatura, la precipitación, la evaporación y la radiación solar, jugando, la cubierta vegetal, un importante papel regulador de estos elementos, además de ser el principal aportante de MO.

La MO (fresca y en coloides orgánicos) tiene efectos importantes en casi todas las propiedades del suelo, como el color, humedad, estructura, capacidad de infiltración, aireación, capacidad de intercambio catiónico (CIC), pH, disolución de minerales, conformación de compuestos órgano-minerales, regulación de microorganismos, hidrofobicidad, fertilidad.

El sistema de clasificación de la *Capacidad de Uso de la Tierra* utiliza como criterio diagnóstico a la fertilidad del suelo, la cual es determinada a partir de análisis de laboratorio

sobre los siguientes elementos: toxicidad por aluminio, pH, contenido de los nutrientes fosforo, potasio, calcio y magnesio y el contenido de MO. Por su parte en el Reglamento Parcial de la Ley de Tierras y desarrollo Agrario de Venezuela (RBV, 2005) no hay un criterio explicito para evaluar la fertilidad del suelo con fines de la clasificación de las tierras, pero si se deben evaluar elementos como el pH, el contenido de MO y el contenido de los nutrientes P y K.

La actividad de los organismos en el perfil del suelo es evaluada directamente mediante observaciones de campo, aunque se pueden hacer estimaciones a partir de la fertilidad, el contenido de MO, el porcentaje de saturación de bases (PSB), la CIC y otras propiedades del suelo. La medición directa del color del suelo es un estimador del contenido de MO, pero se ve afectada por otros factores como el contenido de humedad y el material parental. La utilización de imágenes de sensores remotos para la estimación de esta y otras propiedades del suelo se dificulta por el obstáculo de la cobertura vegetal, sin embargo, son de mucha utilidad para la discriminación de masas vegetales, dado el comportamiento radiométrico de la vegetación, con una baja reflectividad en el espectro visible, particularmente en el rojo, por la absorción de los pigmentos de la hoja, y una alta reflectividad en el infrarrojo cercano (IRC) (Chuvieco, 2002). A partir de esta característica se han desarrollado una serie de índices de vegetación, encontrándose entre los más utilizados el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), que se calcula con la expresión:

$$NDVI = \frac{\rho_{IRC_i} - \rho_{R_i}}{\rho_{IRC_i} + \rho_{R_i}} \quad (5.29)$$

Donde:

ρ_{IRC_i} es la reflectividad de la celda i en la banda del Infrarrojo Cercano (banda 4 del sensor ETM+),

ρ_{R_i} es la reflectividad de la celda i en la banda del Rojo (banda 3 del sensor ETM+).

Este índice varía entre -1 y +1. Los valores negativos corresponden a zonas sin vegetación y los positivos a zonas vegetadas. El umbral de la cubierta vegetal se ubica en torno a 0-0.1 y para la vegetación densa entre 0.5 y 0.7 (Chuvieco, 2002; Eastman, 2006).

El NDVI puede ayudar a mejorar la discriminación de suelos por estimación de la variación de la biomasa en usos particulares de la tierra (McBratney et al., 2003). También

se ha usado para establecer la relación entre el color del suelo y la discriminación del contenido de MO por erosión del horizonte superficial (Singh et al., 2004) o para predecir el contenido de MO del suelo a través de análisis de regresión con otras variables ambientales como el DEM, la precipitación y el índice de sequía del suelo (Oueslati et al., 2009).

Investigaciones teóricas y experimentales han demostrado una relación lineal entre el NDVI y la Fracción Absorbida de Radiación Fotosintéticamente Activa (fAPAR), que es un indicador de la productividad primaria de ecosistemas naturales y cultivados (Olsson y Pilesjö, 2002; Moriondo et al., 2007). En el área de estudio esta relación no es conocida, ni se tienen registros de Radiación Fotosintéticamente Activa (PAR), de Radiación Total o del Índice de Área Foliar, por lo que se utiliza el NDVI como un estimador de la variabilidad espacial de la biomasa vegetal.

5.6. SÍNTESIS

En este capítulo:

1. Se han identificado los algoritmos generalmente utilizados en el campo SIG para la determinación de las variables geomorfométricas relacionadas con los factores formadores del suelo.
2. Los algoritmos de geoprocésamiento identificados se relacionan con la tasa, magnitud y dirección del flujo de materia y energía en el relieve y con los mecanismos de transformación y transporte de estas últimas en el perfil del suelo.
3. Se ha descrito la relación teórica entre los algoritmos y los procesos pedogenéticos, para facilitar la selección de las variables independientes del modelo de regresión, a ajustar para la predicción de la *Capacidad de Uso de la Tierra*. Los algoritmos son clasificados como básicos, hidrológicos y topo-climáticos y se presenta su fundamentación matemática a lo largo del capítulo y en los apéndices respectivos.
4. Se han identificaron 12 variables geomorfométricas básicas, 15 variables hidrológicas y 11 variables topo-climatológicas, las cuales pueden ser determinadas con los algoritmos descritos.
5. No todas las variables identificadas serán utilizadas en el ajuste del modelo de regresión en el área de estudio, ya que deben superar las pruebas de evaluación estadística, sin embargo, se presentan por su utilidad para el futuro ajuste del modelo en otras regiones.

CAPÍTULO 6

DESARROLLO METODOLÓGICO

6.1. INTRODUCCIÓN

En el presente capítulo se desarrolla e implementa el procedimiento metodológico de investigación sintetizado en el Capítulo 1, el cual se fundamenta en la formulación, ejecución y validación de tres modelos concurrentes de geoprocesamiento. El modelo para predecir la *Capacidad de Uso*, conjuntamente con el modelo para estimar la *Vocación de Uso*, permiten hacer la valoración productiva de las tierras o predios agrícolas. El modelo de *Tributación Territorial* permite hacer una estimación de la base imponible a ser gravada por el impuesto territorial de los predios agrícolas, con base en su valoración productiva. El modelo para la predicción de la *Capacidad de Uso* implica la selección y preparación de un DEM, la determinación de las variables geomorfométricas, el ajuste del modelo de regresión y su validación. El ajuste y la validación se realizan tanto de manera global o regional, considerando simultáneamente la totalidad de las Áreas de Referencia del área de estudio, como de manera local, considerando individualmente tres de las Áreas de Referencia. El modelo para la estimación de la *Vocación de Uso* se basa en la generación de un *Índice de Vocación*, derivado de los componentes que definen este término en la legislación venezolana. El modelo para la *Tributación Territorial* se desarrolla a partir de la interpretación del procedimiento establecido en la legislación y su aplicación en escenarios de valoración productiva, en fincas específicas seleccionadas dentro de las Áreas de Referencia.

6.2. MODELO DE GEOPROCESAMIENTO PARA LA PREDICCIÓN DE LA CAPACIDAD DE USO DE LA TIERRA

La metodología propuesta para la evaluación de la *Capacidad de Uso de la Tierra* en zonas con limitada información disponible, se sintetiza en el modelo de geoprocesos presentado en la Figura 6-1.

En esta metodología se ajusta un modelo logístico para determinar la relación entre un conjunto de variables geomorfométricas, vinculadas a la pedogénesis del suelo, con la *Capacidad de Uso de la Tierra* en áreas de muestreo determinadas, seleccionadas por la disponibilidad de información relativa a esta última variable. Los términos independientes del modelo corresponden a variables relacionadas con los factores formadores del suelo: clima, organismos y relieve, y son derivadas del DEM o de la interacción del DEM con elementos ambientales meteorológicos.

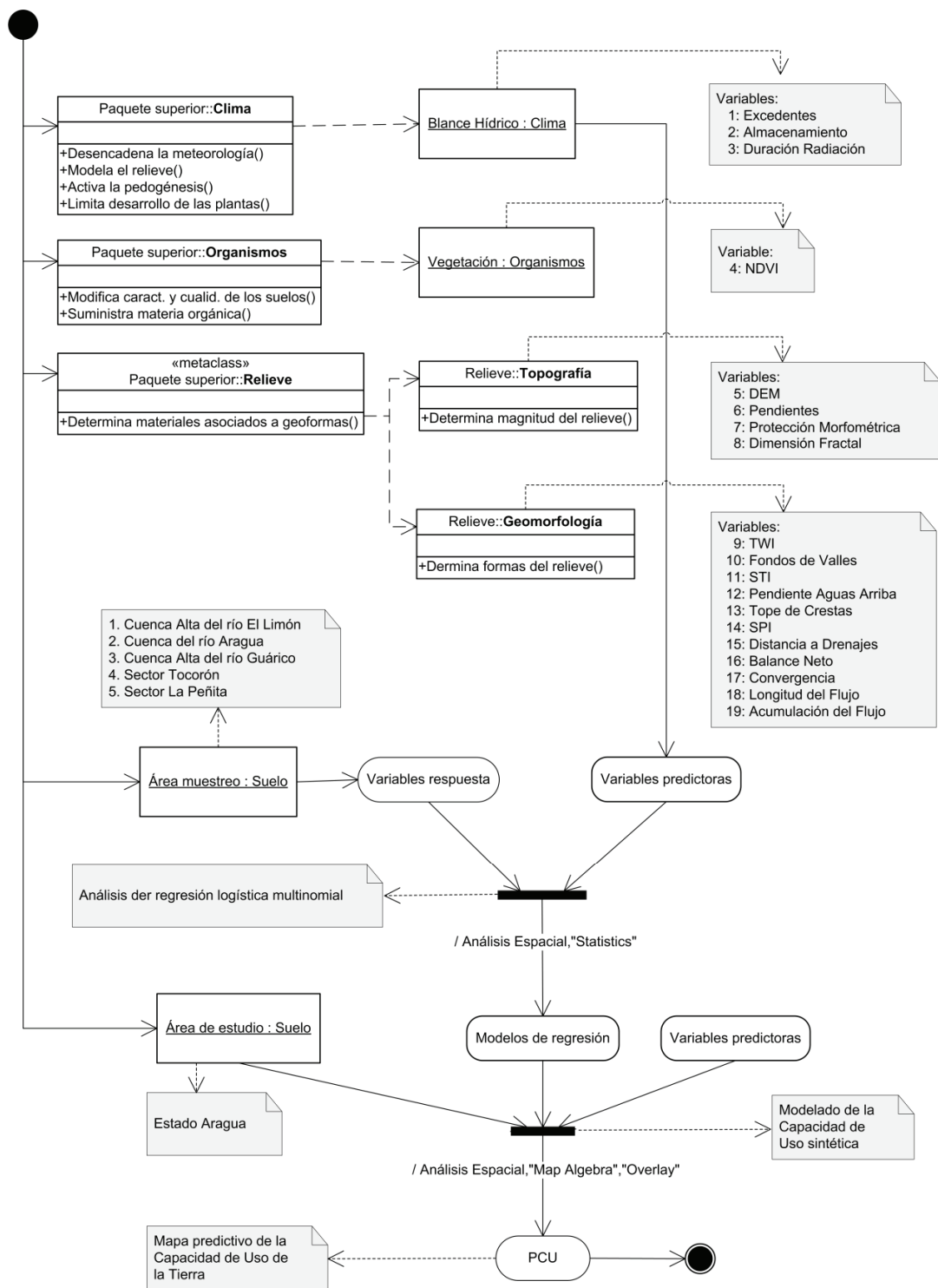


Figura 6-1. Modelo de geoprocésamiento propuesto para la predicción de la Capacidad de Uso de la Tierra.

La aplicación del modelo sobre el área de estudio permite obtener un mapa sintético con la predicción de la *Capacidad de Uso de la Tierra*, el cual constituye el principal insumo para el modelo de impuesto territorial.

Para el desarrollo, aplicación y validación de la metodología, se obtuvo y preparó un DEM; a partir de éste se derivaron variables geomorfométricas por medio de los algoritmos descritos en el Capítulo 5; se ajustó el modelo logístico en relación a la información de suelos disponible en el área de muestreo (variable dependiente) y se validó estadísticamente el modelo.

6.2.1. Obtención y preparación del Modelo Digital de Elevación (DEM)

Se construyó un mosaico con las cuatro imágenes SRTM del área. Éste se evaluó visualmente comparando los elementos topográficos (hidrografía, divisorias, laderas y piedemontes) con la cartografía topográfica 1:100.000 y 1:25.000 y con las ortofotos digitales. En esta evaluación no se detectó ninguna discrepancia, más allá de las diferencias de cota derivadas de la exactitud de los productos o de las características propias del registro en imágenes de radar (en zonas de cubierta boscosa densa o en áreas urbanizadas, los datos registrados no corresponden al suelo desnudo). Las imágenes originales utilizadas corresponden a la versión 2.1 (NASA, 2009), las cuales han sido post-procesadas antes de su liberación para la eliminación de ruido (picos y depresiones falsos), nivelación de cuerpos de agua y definición de líneas de costa.

Se detectaron áreas muy pequeñas sin datos, en concreto 83, 529, 2 022 y 2 777 píxeles en cada imagen, cada una de las cuales se compone de 1 441 200 píxeles. Estos espacios se rellenaron utilizando el algoritmo de interpolación lineal local (Spline) para datos de malla, implementado en el programa SEXTANTE.

Se procedió igualmente con los datos del sensor ASTER (METI-NASA, 2009). En este DEM se detectaron abundantes artefactos, tanto en las zonas planas como en las cimas y laderas de las zonas montañosas. En muchos sitios se ubicaron depresiones anormales, que en un caso fue de más de 60 m de profundidad, conformando una superficie irregular alejada de la realidad presentada en la cartografía topográfica. Estas imperfecciones son advertidas por los autores, quienes para esta primera versión del producto recomiendan un uso experimental o de investigación.

Para hacer una evaluación cuantitativa se tomó un sector del DEM de 144 km² que abarca el área de muestreo Cuenca Alta del Río El Limón (Figura 4-2). En esta zona se dispone de un Modelo Digital del Terreno (DTM²) derivado de mapas topográficos digitales a escala 1:25.000, con curvas de nivel de 20 m de equidistancia, complementadas con puntos de control terrestre (Abarca y Bernabé, 2008a). El DTM se comparó con los DEM del SRTM y ASTER.

Para realizar la comparación, los tres modelos digitales fueron interpolados a celdas de 28.5 m, que corresponde al tamaño de celdas de la imagen Landsat ETM+, la información disponible de mayor resolución. Esta fue la resolución utilizada para todo el procesamiento en SIG. En la Figura 6-2 se pueden observar los tres modelos.

Los dos DEM satelitales tienen artefactos de tipo “moteado”, pero el problema es evidentemente mayor en ASTER. El DEM SRTM muestra una superficie más real, aunque esto debe estar influenciado por el proceso de interpolación empleado para ajustar la resolución. En la Figura 6-3 se muestra el histograma de frecuencia de los errores de cada DEM con relación al mapa topográfico y en el Cuadro 6-1 el resumen estadístico descriptivo.

De acuerdo al análisis de los datos sintetizados en el Cuadro 6-1 y la Figura 6-3, los dos modelos parecen tener similar exactitud vertical en la representación de la altimetría. En el DEM SRTM, errores superiores a 23 m representan en promedio 10% de los datos, errores superiores a 34 m representan 5% de los datos y errores superiores a 70 m representan 1% de los datos. En el DEM ASTER, errores superiores a 25 m representan 10% de los datos, errores superiores a 37 m representan el 5% de los datos y errores superiores a 70 m representan el 1% de los datos.

En relación a la distribución espacial de los errores, la Figura 6-4 muestra para SRTM una distribución muy sesgada de los errores, evidentemente correlacionados con la orientación topográfica. El DEM ASTER tiene una distribución más homogénea, aunque los valores mayores también se presentan en las zonas de relieve más accidentado.

² El DTM refleja la elevación de la superficie de suelo desnudo con relación a una superficie de referencia, como el nivel medio del mar. La elevación reflejada por el DEM puede incluir la elevación de otros objetos encontrados sobre la superficie del suelo, como vegetación densa o edificaciones.

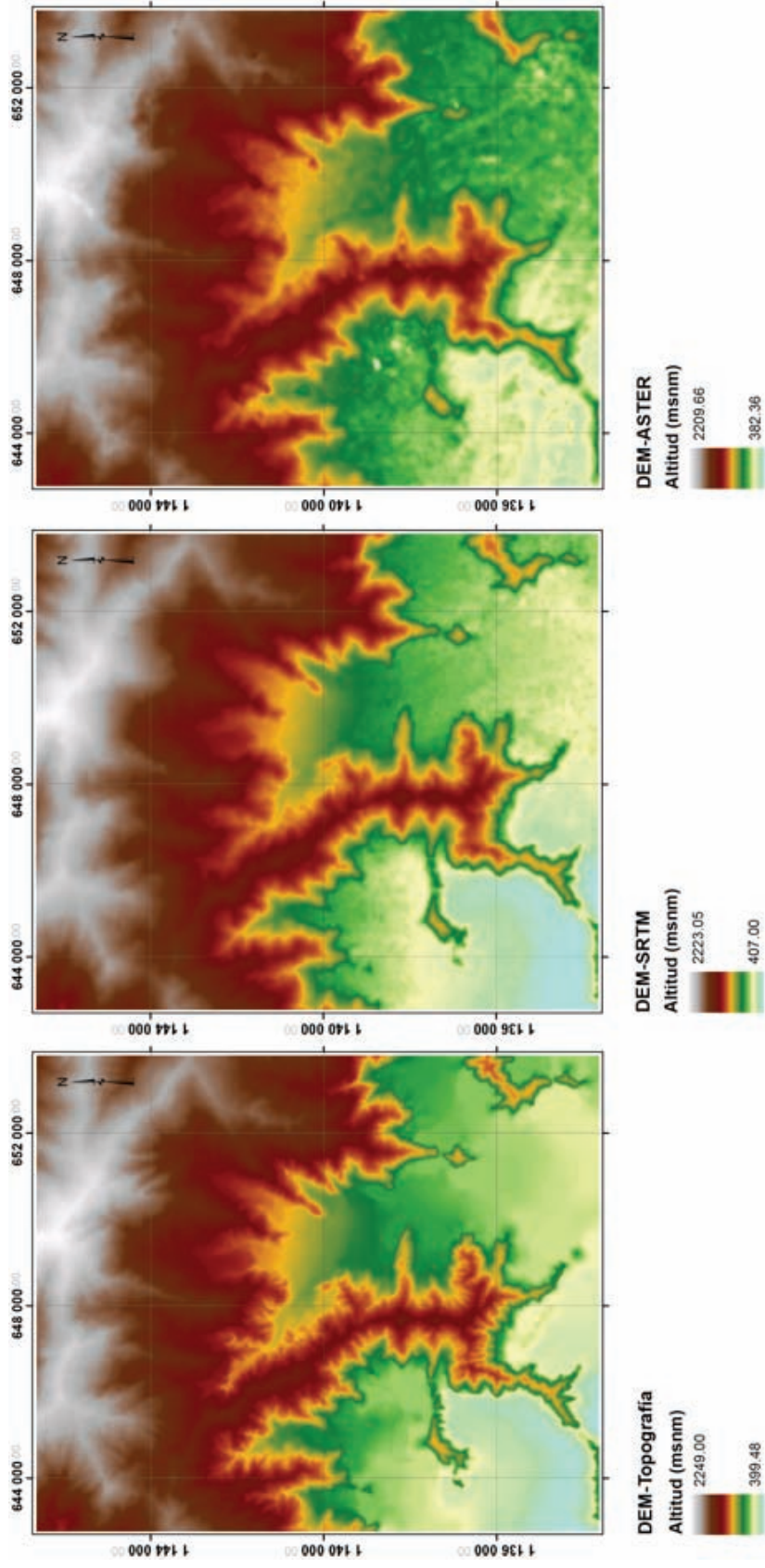


Figura 6-2. DEM provenientes de los sensores SRTM y ASTER, en comparación con un DTM derivado de levantamientos topográficos.

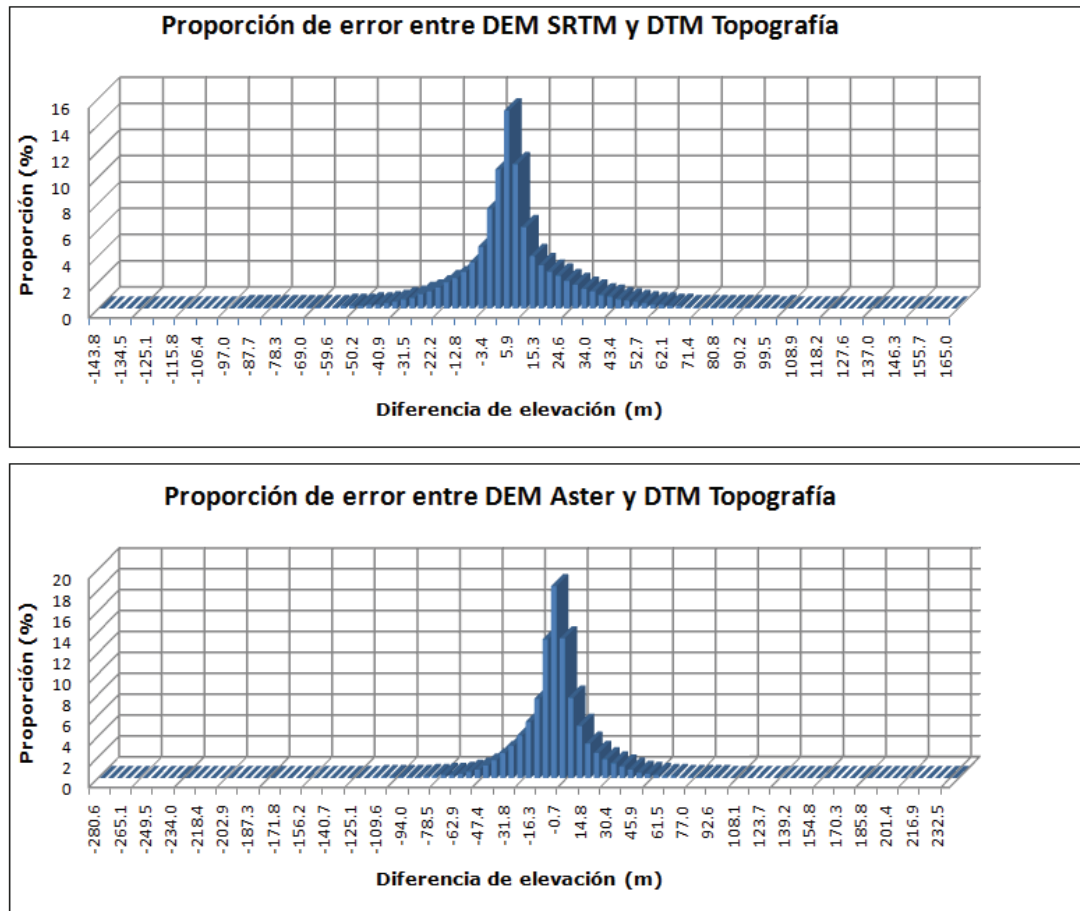


Figura 6-3. Histograma de frecuencia de errores entre DEM derivados de satélites y DTM de mapas topográficos.

Cuadro 6-1. Estadísticas del análisis del error entre DEM satelitales y DTM topográfico.

Estadísticos	SRTM	ASTER
Media	5.23 m	-4.68 m
Desv. Est.	22.57 m	24.86 m
N (# celdas)	176 858	176 858
5% inferior	> -30.89 m	> -47.09 m
10% inferior	> -20.13 m	> -35.35 m
10% superior	> 26.03 m	> 14.34 m
5% superior	> 37.81 m	> 27.25 m

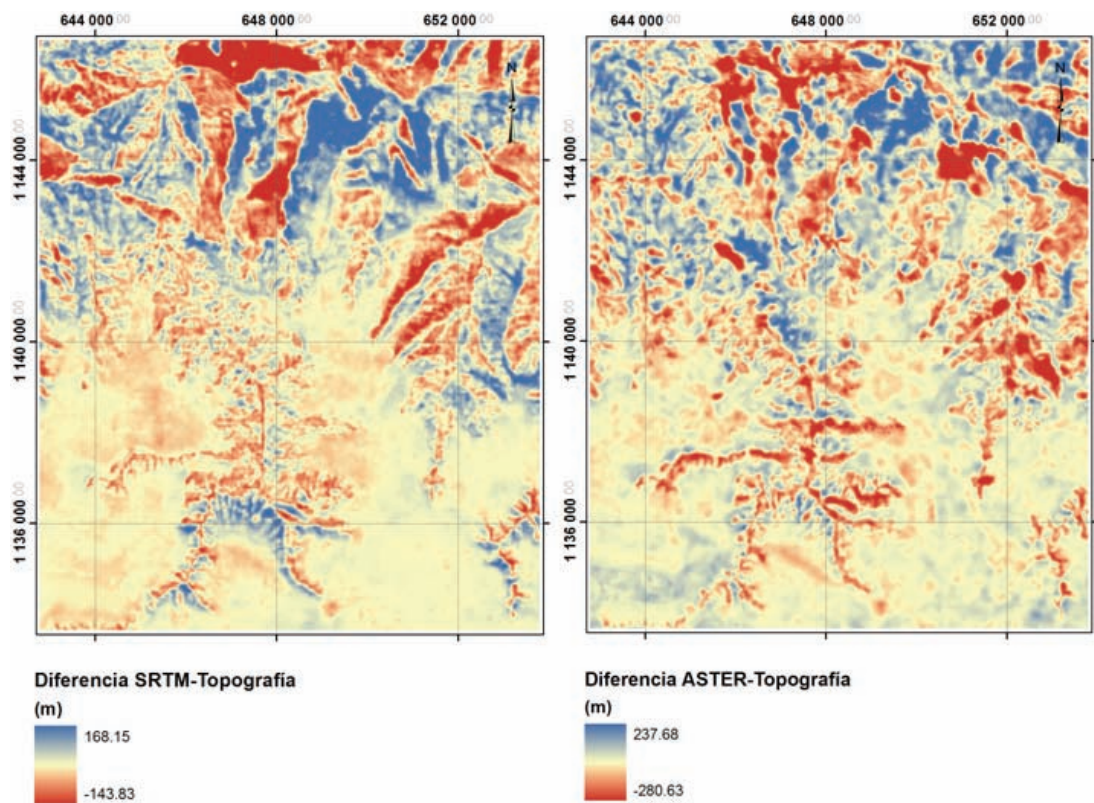


Figura 6-4. Distribución espacial de las diferencias altimétricas entre los DEM satelitales y el DTM topográfico.

En la Figura 6-4 se observa para ambos DEM como los errores negativos (sub-estimación de la altitud por parte de los DEM) se orientan hacia las laderas del norte, nor-oeste y oeste (en la dirección general de la puesta del sol), mientras los errores de mayor magnitud positiva (sobre-estimación de la altitud) tienden a orientarse hacia sur, sur-este y este (en la dirección general del nacimiento del sol). En estas imágenes se representa la distribución espacial de los errores relativos estimados y en la Figura 6-3 se puede observar la magnitud de esta proporción

A pesar de la menor resolución espacial, la selección del DEM SRTM parece ser la apropiada, debido fundamentalmente a la abundancia de artefactos e imperfecciones distribuidas en todo el DEM ASTER, las cuales pudieran afectar el ajuste del modelo de regresión por incorrecciones en las variables geomorfológicas derivadas

En definitiva se seleccionó el DEM SRTM, el cual fue filtrado para eliminar los problemas de ruido, correspondientes a los errores de elevada magnitud detectados en algunas celdas, para lo cual se utilizó el filtro de Lee multidireccional (Lee, 1980), mediante el programa SEXTANTE. Similarmente, con la finalidad de determinar las variables geomorfométricas hidrológicas, se hizo un proceso de rellenado de depresiones (celdas o grupos de celdas aisladas, rodeadas de celdas de mayor altitud, y que son de origen natural o derivadas de defectos en la elaboración del DEM). Estas depresiones deben ser eliminadas para permitir el funcionamiento correcto de los algoritmos de conducción de flujo. Para estos efectos se procesó el DEM con el algoritmo de Jenson y Domingue (1988), implementado por el programa SEXTANTE.

6.2.2. Obtención de las variables geomorfométricas

Las variables geomorfométricas, agrupadas en básicas, hidrológicas y climatológicas, fueron derivadas del DEM, utilizando los algoritmos descritos en el Capítulo 5, implementados en los programas SEXTANTE, SAGA, e IDRISI. Las variables derivadas fueron las indicadas a continuación:

6.2.2.1. Variables geomorfométricas básicas

A partir de la variable *Altitud*, correspondiente al DEM presentado en la Figura 4-1, se derivaron las variables básicas indicadas en el Cuadro 6-2.

En la Figura 6-5 se presenta la variable *Índice de Llanura de Fondos de Valle* y en el Apéndice 6 el resto de variables indicadas en el Cuadro 6-2.

6.2.2.2. Variables geomorfométricas hidrológicas

En el Cuadro 6-3 se indican las variables relacionadas con la hidrología, derivadas de la aplicación de los algoritmos correspondientes sobre el DEM.

En la Figura 6-6 se muestra el *Índice Topográfico de Humedad* y en el Apéndice 7 el resto de variables hidrológicas.

Cuadro 6-2. Variables geomorfológicas básicas evaluadas.

Variable	Unidad	Algoritmo	Software
Elevación (DEM)	km	DEM-SRTM	SEXTANTE
Pendiente (PEND)	%	Ec. 2 ^{do} Orden (Zevenbergen y Thorne, 1987)	SEXTANTE
Orientación (ORI)	(°)	Ec. 2 ^{do} Orden (Zevenbergen y Thorne, 1987)	SEXTANTE
Curvatura vertical (CURV)	-	Ec. 2 ^{do} Orden (Zevenbergen y Thorne, 1987)	SEXTANTE
Curvatura horizontal (CURH)	-	Ec. 2 ^{do} Orden (Zevenbergen y Thorne, 1987)	SEXTANTE
Curvatura general (CURG=CURV+CURH)	-	Ec. 2 ^{do} Orden (Zevenbergen y Thorne, 1987)	SEXTANTE
Índice de Convergencia (CONV)	-	Köthe et al. (1996)	SEXTANTE
Formas del Terreno (FORM)	-	Peucker y Douglas (1975)	SEXTANTE
Dimensión Fractal (FRACT)	-	Eastman (2006)	IDRISI
Índice de Protección Morfológica (MPI)	-	Jenness (2007)	SEXTANTE
Índice de Llanura de Fondos de Valles (FONV)	-	Gallant y Dowling (2003)	SAGA
Índice de Llanura de Cimas de Crestas (TOPCR)	-	Gallant y Dowling (2003)	SAGA

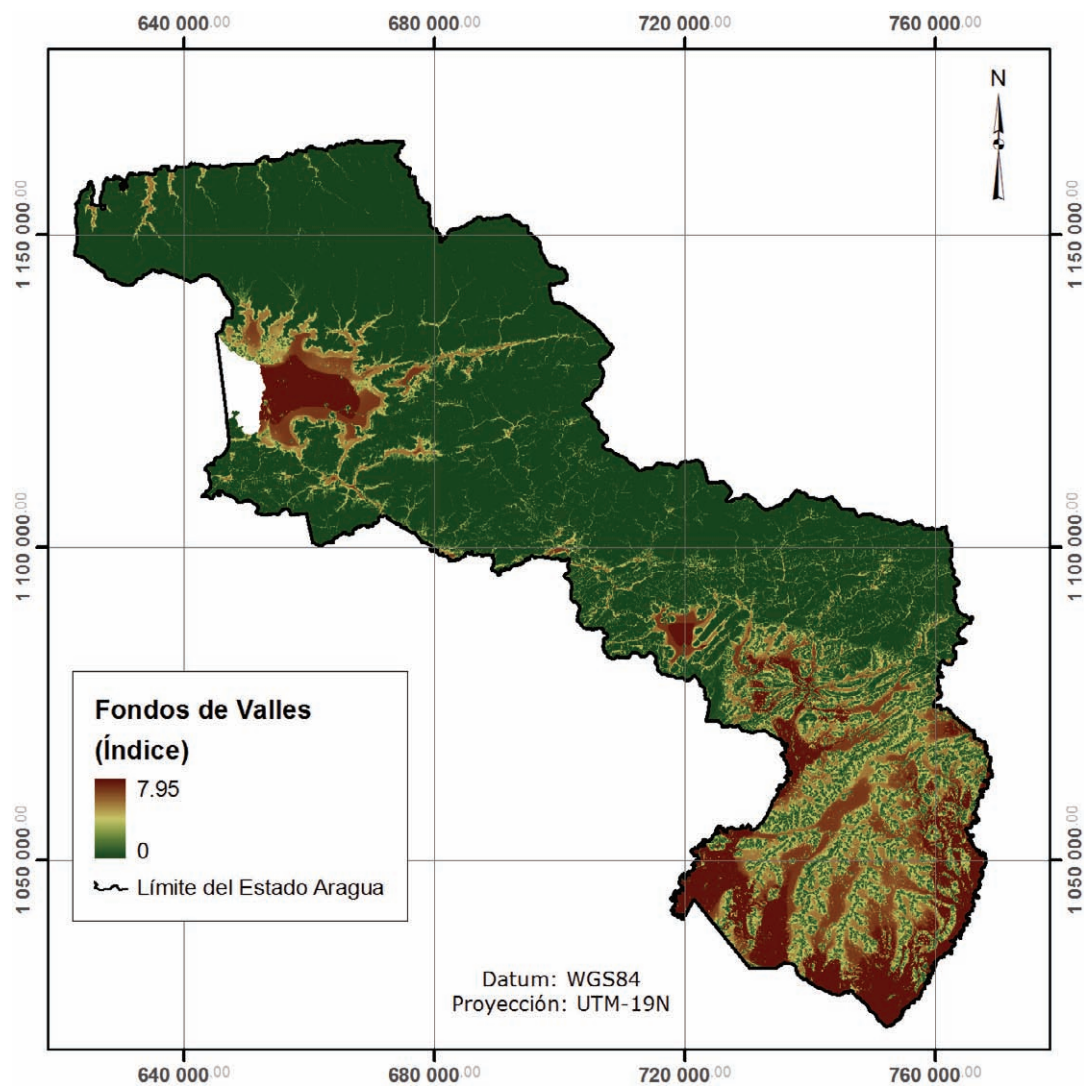


Figura 6-5. Índice de Llanura de Fondos de Valle.

Cuadro 6-3. Variables geomorfométricas hidrológicas evaluadas.

Variable	Unidad	Algoritmo	Software
Acumulación de Flujo (ACU)	ha	Quinn et al., 1991 Freeman, 1991	SEXTANTE
Longitud de las Vías de Flujo (LONF)	km	Quinn et al., 1991 Freeman, 1991	SEXTANTE
Longitud de Pendientes (LONP)	km	Quinn et al., 1991 Freeman, 1991	SEXTANTE
Distancia natural a la red de drenaje (DISNR)	km	Quinn et al., 1991 Freeman, 1991	SEXTANTE
Distancia horizontal a la red de drenaje (DISHR)	km	Quinn et al., 1991 Freeman, 1991	SEXTANTE
Distancia vertical a la red de drenaje (DISVR)	km	Quinn et al., 1991 Freeman, 1991	SEXTANTE
Elevación promedio aguas arriba (ALTA)	km	Quinn et al., 1991 Freeman, 1991	SEXTANTE
Pendiente promedio aguas arriba (PENDA)	%	Quinn et al., 1991 Freeman, 1991	SEXTANTE
Orientación promedio aguas arriba (ORIA)	(°)	Quinn et al., 1991 Freeman, 1991	SEXTANTE
Ancho del flujo (ANCHF)	m	Mass-Flux (Gruber y Peckham, 2009)	SAGA
Índice Topográfico de Humedad SAGA (TWI)	-	SAGA (2007) adaptado de Beven y Kirkby (1979)	SAGA
Índice de Potencia de Flujo (SPI)	-	Moore et al., 1993	SEXTANTE
Índice de Transporte de Sedimentos (STI)	-	RUSLE3D (Moore et al., 1992)	SAGA
Balance Neto (BALN)	-	Olaya (2006)	SEXTANTE
Índice de Balance de Masas (IBM)	-	Böhner y Selige (2006)	SAGA

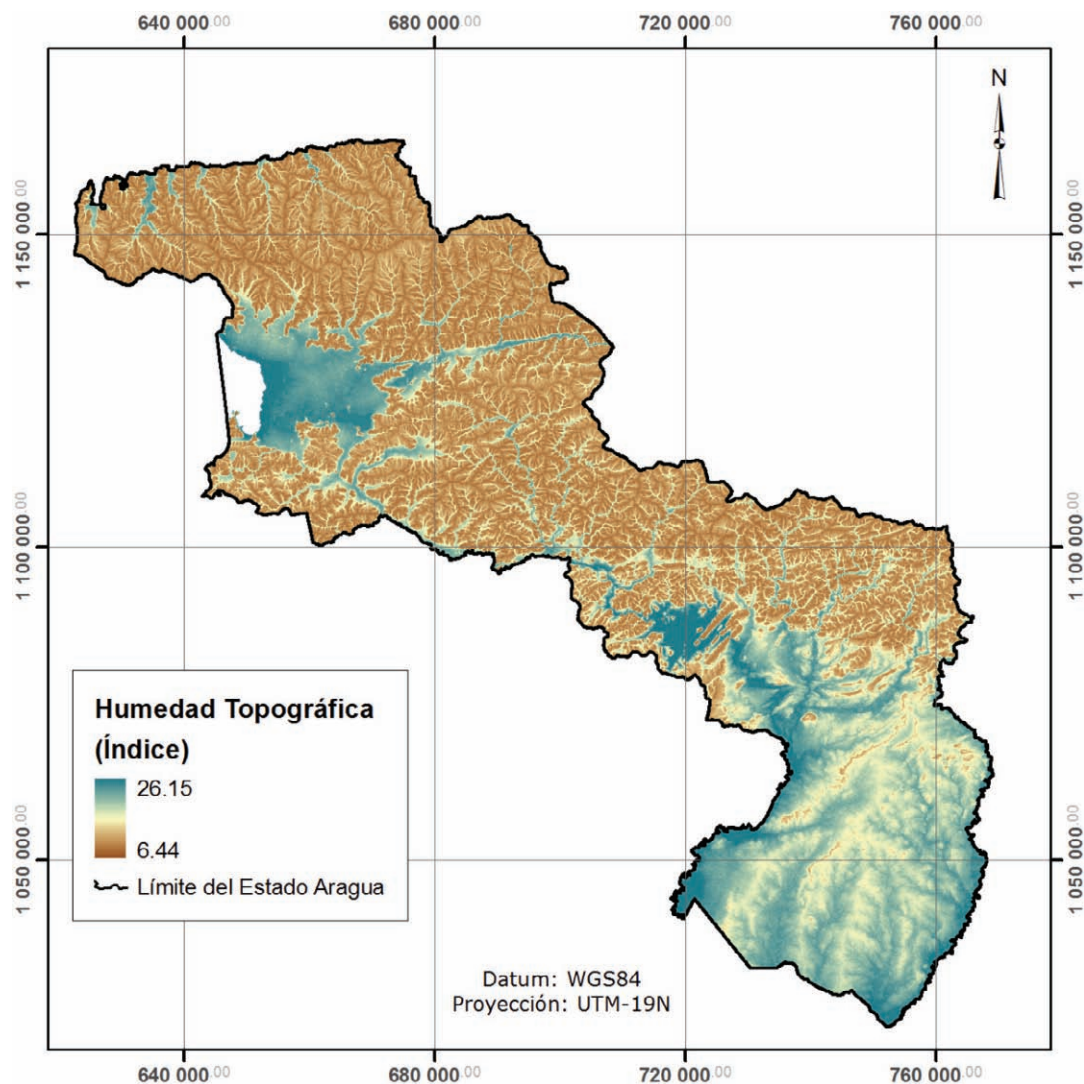


Figura 6-6. Índice Topográfico de Humedad.

6.2.2.3. Variables geomorfológicas topo-climatológicas

En el Cuadro 6-4 se indican las variables relacionadas con la topo-climatología, derivadas del desarrollo de los algoritmos correspondientes sobre el DEM y los datos de la red de estaciones climáticas del área de estudio. En este grupo se incluye la variable *NDVI* por su relación con la climatología a través de la biomasa vegetal deducida de su interpretación.

Cuadro 6-4. Variables geomorfométricas topo-climatológicas evaluadas.

Variable	Unidad	Algoritmo	Software
Radiación Solar Potencial (RAD)	kWh/m ²	Bohner y AntoniĆ (2009)	SAGA
Duración Radiación Solar (DURAD)	h/año	Bohner y AntoniĆ (2009)	SAGA
Calor Anisotrópico Diurno (CALD)	-	Bohner y AntoniĆ (2009)	SAGA
Precipitación anual (PRE)	mm	Kriging Ordinario	SEXTANTE
Temperatura anual (TEM)	°C	Regresión lineal	SEXTANTE
Evaporación anual (EVA)	mm	Regresión Lineal Múltiple	SEXTANTE
Evapotranspiración anual (ETP, ETR)	mm	Tanque evapormétrico (FAO, 2006)	SEXTANTE
Déficit Anual de Humedad del suelo (DEF)	m	Balance Hídrico mensual	SEXTANTE
Excedente Anual de Humedad del Suelo (EXC)	m	Balance Hídrico mensual	SEXTANTE
Almacenamiento Anual de Humedad del Suelo (ALM)	m	Balance Hídrico mensual	SEXTANTE
Índice de Vegetación (NDVI)	-	NDVI	SEXTANTE

Para la obtención de la variable *Precipitación Anual* se elaboró un mapa de puntos con los valores anuales promedio de precipitación en la red de estaciones climáticas del Estado Aragua, así como de los estados vecinos cercanos (Carabobo, Yaracuy, Guárico, Miranda, Vargas y Distrito Capital) (Figura 6-7). Este mapa se interpoló a una malla raster con la resolución empleada en las variables geomorfométricas, mediante el algoritmo Kriging Ordinario, implementado por SEXTANTE (Olaya, 2006). Para esta interpolación se elaboró el semivariograma mostrado en la Figura 6-8, el cual alcanza una meseta de 175 000 mm² a una distancia de 75 000 m, con un modelo de ajuste esférico. El procedimiento se repitió para todos los meses del año. En el Apéndice 8 se muestran los mapas de precipitación obtenidos para los promedios mensuales del registro histórico.

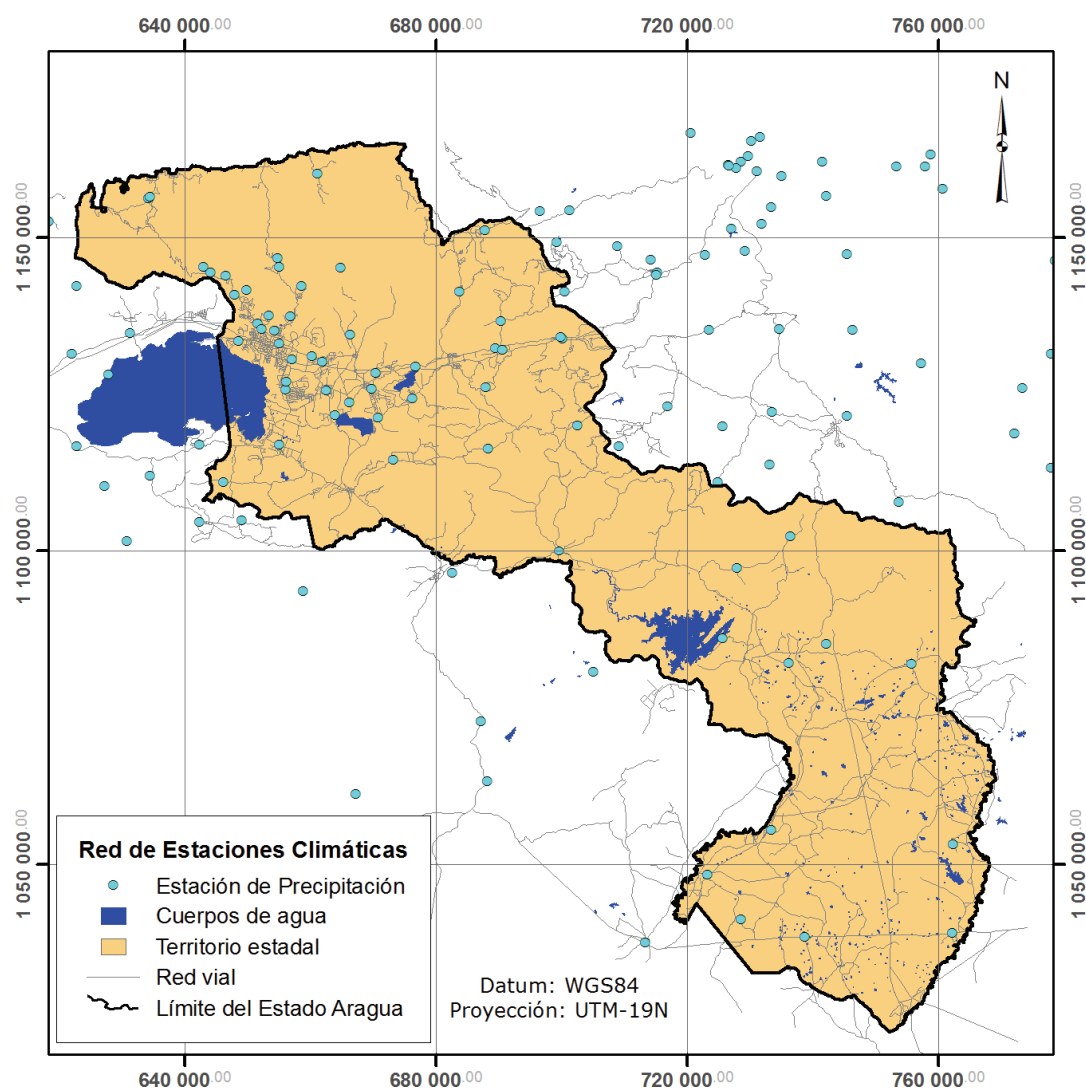


Figura 6-7. Red de estaciones climáticas del área de estudio y estados vecinos.

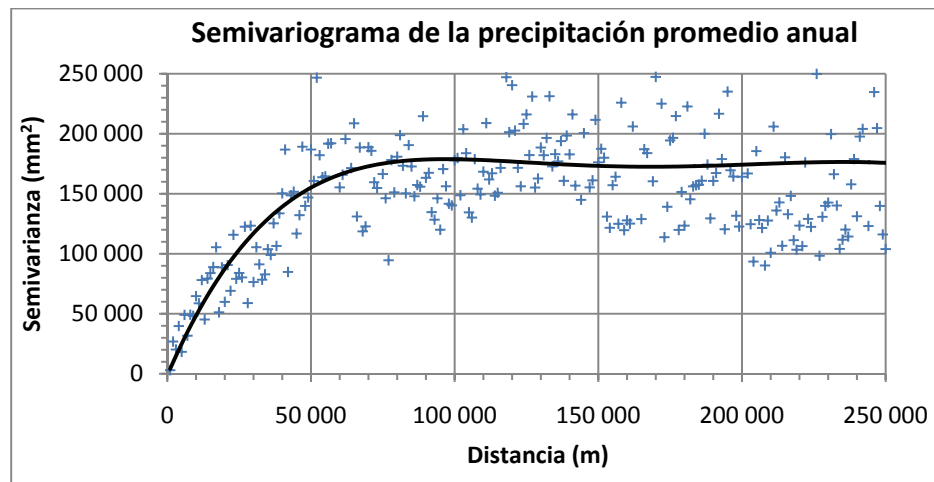


Figura 6-8. Semivariograma para la precipitación media anual de la red de estaciones climáticas del Estado Aragua y estados vecinos.

En el área de estudio existen muy pocas estaciones con registros de Evaporación. Dada esta circunstancia se ajustó un modelo estadístico que permitiera predecir el valor anual y los valores mensuales para el desarrollo del balance hídrico regional. La variable *Evaporación Anual (EVA)* se obtuvo ajustando un modelo lineal múltiple con las variables *Altitud (DEM)*, *Precipitación (PRE)* y *Temperatura (TEM)* (para las estaciones con registros disponibles de estos parámetros). El modelo anual obtenido tiene un R^2 de 79.56% ($p=9E-8$) y la siguiente expresión:

$$EVA = -3595.5404 - 0.0527 * PRE + 212.8292 * TEM + 0.7382 * DEM \quad (6.1)$$

Se procedió similarmente para todos los meses del año, obteniendo los parámetros de ajuste de los modelos de regresión múltiple presentados en el Apéndice 9.

Ante la falta de información climática para aplicar métodos más precisos, se estimó la evapotranspiración de referencia a partir del coeficiente del tanque evaporimétrico, el cual, para las condiciones promedio de HR, velocidad del viento y vegetación, de las estaciones climáticas evaluadas, adopta un valor de 0.80 (FAO, 2006). Este factor ajusta la variable *Evaporación (EVA)* obtenida con la Ecuación 6.1, para obtener la variable *Evapotranspiración (ETP, ETR)*.

El balance hídrico se obtuvo a partir de las variables *Precipitación (PRE)* y *Evapotranspiración (ETP, ETR)*, aplicando los algoritmos indicados en el Capítulo 5 (punto 5.5.3). En la Figura 6-9 se presenta la variable *Excedente Anual de Humedad del Suelo*

(EXC), derivada del balance hídrico, y en los Apéndices 10, 11 y 12 los mapas correspondientes a los Déficits [$DEF_{(i)}$], Excedentes [$EXC_{(i)}$] y Almacenamientos [$ALM_{(i)}$] promedios mensuales de humedad en el suelo.

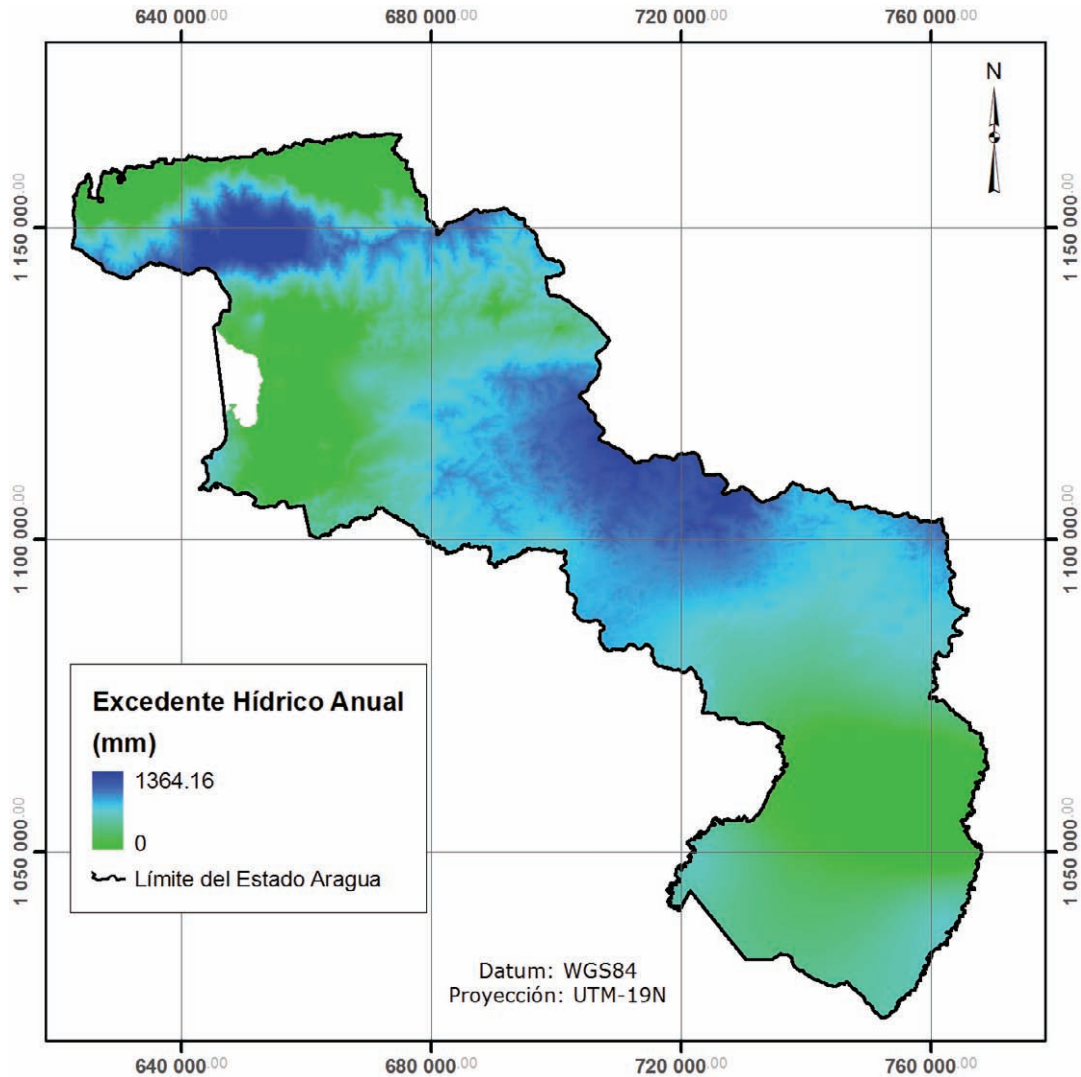


Figura 6-9. Excedente anual de humedad del suelo.

Para el área de estudio se tienen disponibles dos imágenes Landsat ETM+. Una imagen del año 2001 cubre la casi totalidad del estado y una imagen del año 2000 cubre un pequeño sector al noroeste. Abarca y Ormeño (2009) hicieron un mosaico y corrigieron los efectos de la atmósfera y la topografía, sin embargo se mantienen problemas de nubosidad en pequeños sectores del norte y en el extremo sur-este de la imagen.

En la Figura 6-10 se muestra la variable Índice Normalizado de Diferencia de Vegetación, obtenida del mosaico Landsat. El resto de variables topo-climáticas del Cuadro 6-4 se presenta en el Apéndice 13.

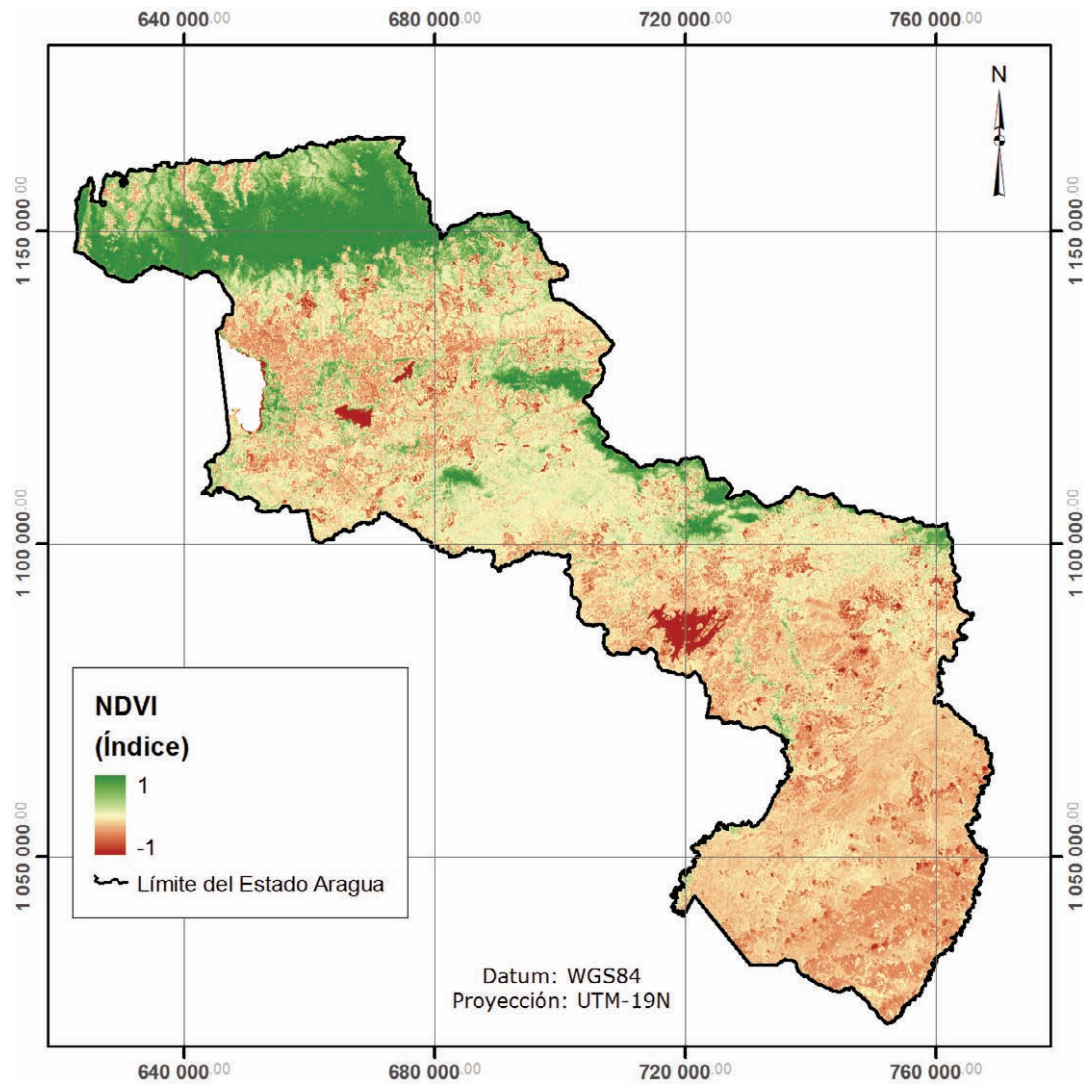


Figura 6-10. Índice Normalizado de Diferencia de Vegetación.

6.2.3. Ajuste del modelo de regresión

Se utilizó un modelo de regresión logística dado que se propone predecir una variable de tipo discreta o categórica (*Capacidad de Uso de la Tierra*) a partir de variables continuas derivadas del DEM (geomorfométricas).

Se derivaron las 38 capas de información indicadas en los Cuadro 6-2, 6-3 y 6-4 para ser evaluadas como variables predictoras del modelo. En el Apéndice 14 se muestra la matriz de correlación de estas variables. Se descartaron 4 de las variables por presentar perfecta colinealidad (correlación de $R^2 = 1$ con alguna otra variable). Estas variables fueron: Distancia Horizontal a la Red de Drenaje, Evapotranspiración, Evaporación y Temperatura. Se realizó un análisis bivalente que condujo al descarte de otras 15 variables por no ser estadísticamente influyentes (nivel de significancia $p \approx 1$) y por presentar alta colinealidad (correlación de $R^2 > 0.90$ con alguna otra variable). Finalmente se seleccionaron las variables indicadas en el Cuadro 6-5, ordenadas de mayor a menor nivel de importancia en el ajuste del modelo (según la magnitud del estadístico χ^2).

Cuadro 6-5. Variables geomorfométricas seleccionadas para el ajuste del modelo de regresión.

	Código	Variable
1	DEM	Elevación
2	TWI	Índice Topográfico de Humedad
3	PEND	Pendientes
4	FONV	Índice de Llanura de Fondos de Valles
5	STI	Índice de Transporte de Sedimentos
6	EXC	Excedente Anual de Humedad del Suelo
7	MPI	Índice de Protección Morfométrica
8	DURAD	Duración de Radiación Solar
9	ALM	Almacenamiento Anual de Humedad del Suelo
10	PENDA	Pendiente Aguas Arriba
11	TOPCR	Índice de Llanura de Cimas de Crestas
12	SPI	Índice de Potencia de Flujo
13	DISNR	Distancia Natural a la Red de Drenaje
14	BALN	Balance Neto de Sedimentos
15	FRACT	Dimensión Fractal
16	LONF	Longitud de las Vías de Flujo
17	NDVI	Índice Normalizado de Diferencia de Vegetación
18	ACU	Acumulación de Flujo
19	CONV	Índice de Convergencia

El ajuste del modelo logístico se realizó ejecutando los siguientes pasos:

- Selección de una categoría de referencia en la variable dependiente: se tomó como referencia la categoría 70, que identifica a la clase VII del mapa de *Capacidad de Uso*. Las ecuaciones de regresión del modelo logístico permiten determinar la probabilidad de

ocurrencia de cada categoría de la variable dependiente con relación a otra variable tomada como referencia.

- Determinación de áreas a excluir del cálculo: se utilizó una capa máscara para excluir del análisis las áreas correspondientes a los cuerpos de agua superficiales, así como los polígonos que representan a los núcleos urbanos y sus áreas de expansión (estas entidades son conocidas como áreas misceláneas en el mapa de *Capacidad de Uso* de las Áreas de Referencia). La capa máscara se obtuvo por digitalización de las áreas misceláneas.
- Definición del tamaño de muestreo: se seleccionó un muestreo aleatorio estratificado de 10% de las celdas de cada categoría en el mapa de las Áreas de Referencia (Figura 4-2).
- Ejecución iterativa del algoritmo de ajuste: se corrió el modelo repetidamente, con la incorporación de cada variable geomorfológica o combinaciones de estas, hasta incluir todas las variables del Cuadro 6-5 y obtener los valores más altos de los estadísticos de evaluación (Cuadro 6-6).

Cuadro 6-6. Estadísticos de ajuste del modelo de regresión logística definitivo.

	Estadístico	Valor
Ajuste del modelo	$-2LnL_0$ (sólo intercepto)	625 991.1796
	$-2LnL_m$ (intercepto+covariables)	327 657.8772
	χ^2	298 333.3024
	Grados de libertad	304
	Significancia (p)	0.00
	Pseudo R^2 (McFadden)	0.4766
Clasificación	Celdas correctas (%)	77.31
	Cramer's V	0.3986

El ajuste del modelo produjo los parámetros de las ecuaciones logísticas para cada categoría de clasificación presentados en el Apéndice 15. A modo de ejemplo, para la categoría 40 (clase de *Capacidad de Uso IV*) la ecuación de regresión es la siguiente:

logit (Clase IV |Clase VII)

$$\begin{aligned}
 &= -270.5770 - 14.0953(DEM) - 0.2586(PEND) + 0.1570(FONV) \\
 &- 0.1688(TWI) - 14.8808(SPI) + 0.1039(STI) - 16.0410(EXC) \\
 &+ 0.0073(DURAD) - 5.0415(ALM) - 0.0056(PENDA) - 0.0697(DISNR) \\
 &+ 0.4278(TOPCR) + 14.1893(MPI) + 0.0072(CONV) + 0.7156(LONF) \\
 &- 0.0060(BALN) + 126.1112(FRACT) + 0.0390(ACU) \\
 &- 2.8020(NDVI) \quad (6.2)
 \end{aligned}$$

De acuerdo a Debella-Gilo et al. (2007), la interpretación de los coeficientes del modelo logístico puede ser útil para conocer el tipo e intensidad de la relación entre las categorías de la variable dependiente y las variables geomorfométricas independientes. Si las variables no están estandarizadas, en vez de interpretar los coeficientes directamente, es más adecuado evaluar la razón de odds (e^{β}). La razón de odds puede tomar valores entre 0 y $+\infty$ (Capítulo 3) y es el número por el cual se debe multiplicar el odds de la variable dependiente (probabilidad dividida por uno menos la probabilidad) por cada unidad de incremento en la variable independiente (Menard, 2002). Una razón de odds mayor que 1 indica que el odds de una categoría de *Capacidad de Uso* se incrementa cuando la variable independiente se incrementa (correlación positiva). Una razón odds menor que 1 indica que el odds de una categoría de *Capacidad de Uso* disminuye cuando la variable independiente se incrementa (correlación negativa). Una razón de odds de 1 indica que un incremento de una unidad de una variable geomorfométrica dada no influye en el odds de la categoría de *Capacidad de Uso*.

Las variables no se estandarizan para poder hacer interpretaciones físicas de sus magnitudes, por lo que están expresadas en diferentes unidades. Por este motivo no se pueden hacer comparaciones de las magnitudes de la razón de odds entre las variables, pero si del signo de la correlación y la lejanía de la razón con respecto a la unidad, lo que indica la fortaleza de la relación.

En el Apéndice 16 se presenta la razón de odds (e^{β}) de cada uno de los coeficientes de las ecuaciones de regresión determinados por el modelo, para cada categoría de *Capacidad de Uso*.

6.2.4. Validación del modelo de regresión

6.2.4.1. Validación del modelo a escala regional

Los estadísticos obtenidos durante el ajuste del modelo (Cuadro 6-6) permitieron su validación parcial. El logaritmo de la verosimilitud ($-2LnL_0$), análogo a la sumatoria de los errores cuadrados en el análisis de regresión lineal, así como el índice de McFadden, análogo al coeficiente R^2 en regresión lineal, proporcionan una idea de la fortaleza de la relación entre las variables independientes (geomorfométricas) y la variable dependiente (*Capacidad de Uso de la Tierra*), y su nivel de significancia estadística. Por otra parte, la razón de Odds da una idea del tipo e intensidad de la relación entre cada variable independiente con la variable dependiente. La validación se completó aplicando las ecuaciones de regresión generadas por el modelo para derivar el mapa de predicción de la *Capacidad de Uso de la Tierra* y comparando las celdas correctamente clasificadas en la predicción. Este mapa se muestra en la Figura 6-11, comparado con el mapa original de *Capacidad de Uso*, derivado de levantamientos edafológicos convencionales, el cual fue utilizado para el muestreo de la variable dependiente.

La Tabla de Contingencia (Apéndice 17) directamente permite hacer una validación de la clasificación de celdas predicha por el modelo, sin embargo tiene deficiencias, tal como se describe en el Capítulo 3, por lo que su utilidad principal está en el ajuste del modelo. En general los estadísticos mencionados permitieron optimizar el ajuste del modelo mediante la aplicación iterativa del algoritmo de análisis hasta lograr el conjunto y combinación de variables geomorfométricas con el que se obtuvo el máximo valor de los estadísticos.

Los resultados de la predicción se evaluaron de acuerdo a la metodología propuesta por Pontius, (2002, 2000) obteniéndose los índices de concordancia presentados en el Cuadro 6-7.

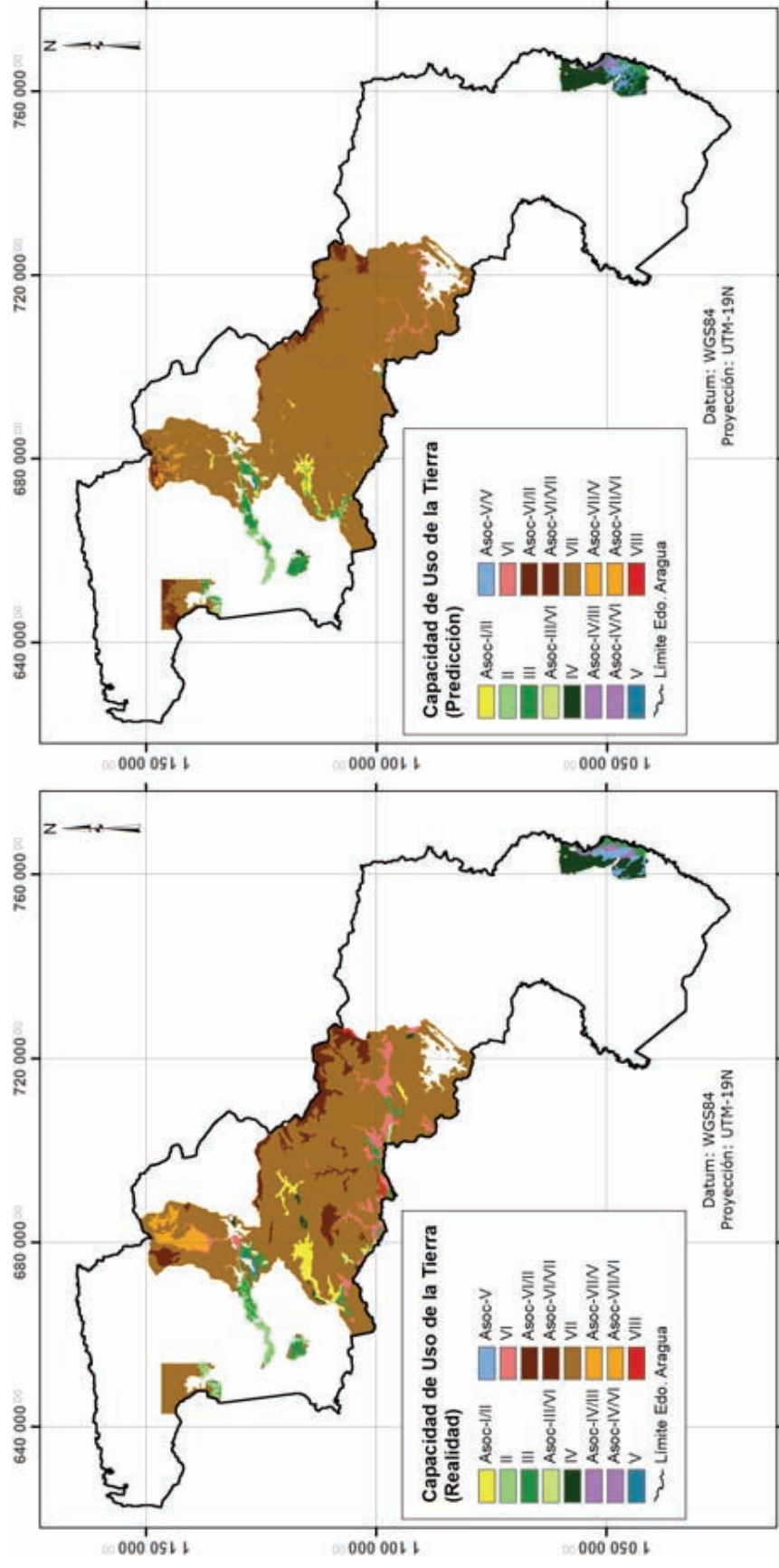


Figura 6-11. Mapas de Capacidad de Uso de la Tierra del área de estudio (levantamiento convencional y predicción del modelo).

Cuadro 6-7. Índices de concordancia derivados de la comparación entre el mapa real de Capacidad de Uso de la Tierra y el mapa predicho por el modelo de regresión.

Índice	Valor
k_{no}	0.7589
$k_{location}$	0.6063
$k_{quantity}$	0.9967
$k_{standard}$	0.4408

La aplicación del modelo de regresión sobre todo el territorio del Estado Aragua permite obtener mapas para cada clase de *Capacidad de Uso*, con la distribución de la probabilidad de ocurrencia de cada celda. La extracción del valor de mayor probabilidad de ocurrencia de cada celda, entre todos los mapas, permite generar el mapa de predicción dura de la *Capacidad de Uso de la Tierra* en todo el Estado. Este mapa se presenta en la Figura 6-12.

6.2.4.2. Validación del modelo a escala local

El área de estudio corresponde a una región extensa de gran variabilidad geomorfométrica, con valles profundos y estrechos, en las estribaciones de la Cordillera de la Costa, los cuales se van explayando de manera abrupta hacia la costa norte, o más gradualmente hacia la planicie del Lago de Valencia y en el piedemonte de la Serranía del Interior. El tercio sur del Estado comprende una región de colinas y llanuras de geomorfología muy diferenciada en relación al norte. Para considerar el efecto de esta variabilidad regional se ajustó el modelo independientemente sobre tres de las áreas de muestreo, Cuenca Alta del Río El Limón, Sector Tocarón y Sector La Peñita (Figura 4-2). Estos sectores tienen una configuración fisiográfica relativamente homogénea, la primera caracteriza el ambiente montañoso de la Serranía del Litoral, la segunda a la planicie lacustrina del Lago de Valencia y la tercera a los llanos disectados centrales.

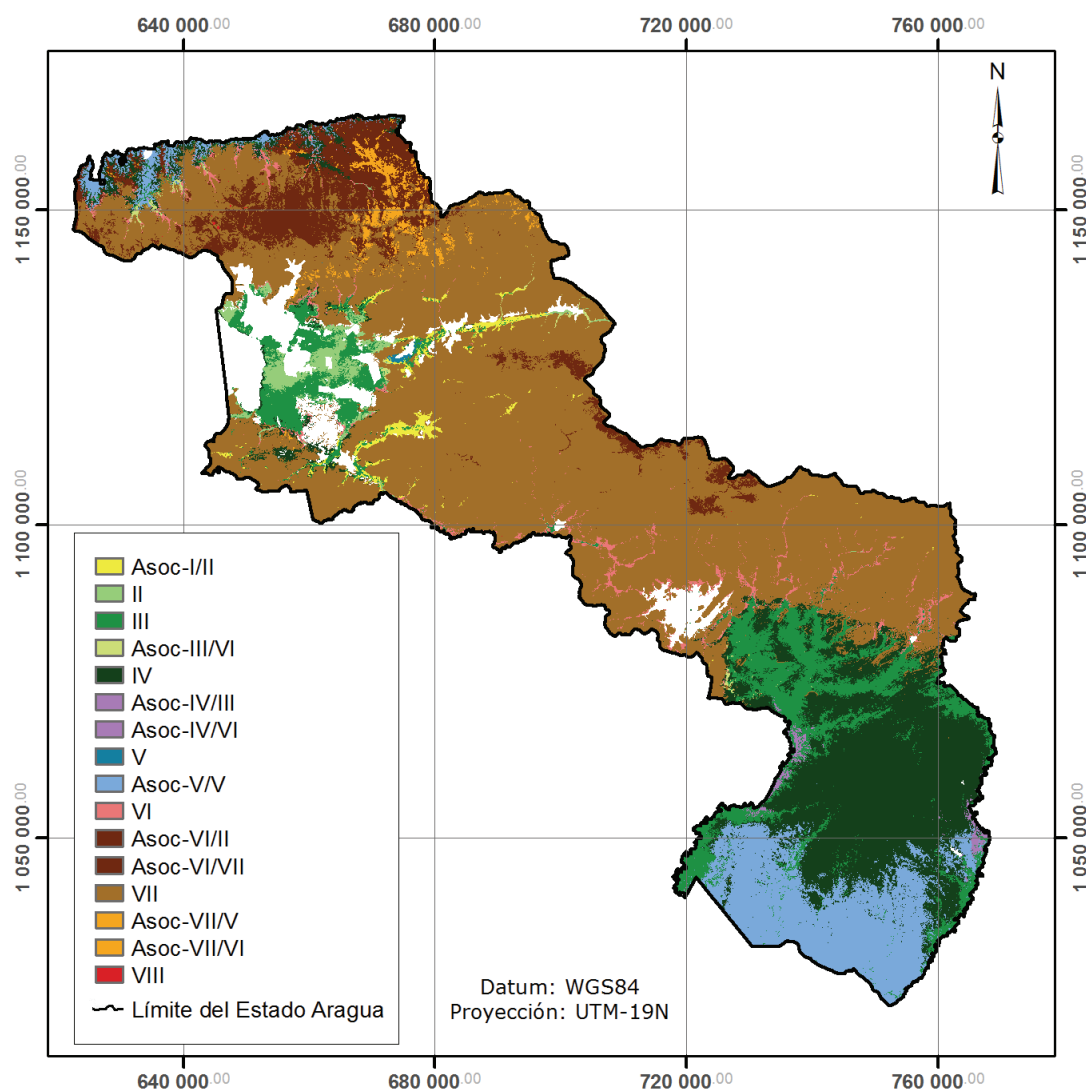


Figura 6-12. Predicción de la Capacidad de Uso de la Tierra en el Estado Aragua.

En el Cuadro 6-8 se presentan los resultados del ajuste del modelo en la Cuenca Alta del Río El Limón, realizado con las mismas variables independientes y el mismo DEM utilizado en el modelo regional, derivado del SRTM. En el Cuadro 6-9 se observan los índices de concordancia correspondientes a la predicción realizada con este ajuste.

Cuadro 6-8. Ajuste del modelo en el sector Cuenca Alta del Río El Limón (DEM SRTM).

	Estadístico	Valor
Ajuste del modelo	$-2LnL_0$ (sólo intercepto)	10 017.2686
	$-2LnL_m$ (intercepto+covariables)	2 360.2054
	Chi ²	7 657.0632
	Grados de libertad	57
	Significancia (p)	0.00
	Pseudo R ² (McFadden)	0.7644
Clasificación	Celdas correctas (%)	94.64
	Cramer's V	0.5836

Cuadro 6-9. Índices de concordancia (*Capacidad de Uso/Predicción*) en la Cuenca Alta del Río El Limón (DEM SRTM).

Índice	Valor
k_{no}	0.9338
$k_{location}$	0.8809
$k_{quantity}$	0.9974
$k_{standard}$	0.7932

En este sector se tiene disponible un DEM generado mediante las cartas topográficas 1:25.000 de la zona, el cual fue utilizado para evaluar las fuentes disponibles de información altimétrica. Se utilizó también este DEM para generar el conjunto de variables geomorfométricas, realizar un nuevo ajuste local del modelo y compararlo con el procedimiento realizado con el DEM SRTM. Este análisis comparativo se realizó con la finalidad de evaluar el efecto de la escala de la información topográfica en el ajuste del modelo y en los resultados de la predicción. Los Cuadros 6-10 y 6-11 muestran los resultados de esta evaluación.

En el Cuadro 6-12 se observan los resultados del ajuste del modelo en el Sector Tocarón del área de estudio. De forma similar al primer ajuste local del sector anterior, se realizó el ajuste sobre una ventana de las mismas variables independientes utilizadas en el modelo regional. En el Cuadro 6-13 se muestran los índices de concordancia obtenidos de la clasificación realizada con este ajuste.

Cuadro 6-10. Ajuste del modelo en el sector Cuenca Alta del Río El Limón (DEM topografía).

	Estadístico	Valor
Ajuste del modelo	$-2LnL_0$ (sólo intercepto)	10 101.3809
	$-2LnL_m$ (intercepto+covariables)	2 405.3356
	Chi ²	7 696.0453
	Grados de libertad	57
	Significancia (p)	0.00
	Pseudo R ² (McFadden)	0.7619
Clasificación	Celdas correctas (%)	94.71
	Cramer's V	0.5837

Cuadro 6-11. Índices de concordancia (*Capacidad de Uso/Predicción*) en la Cuenca Alta del Río El Limón (DEM topografía).

Índice	Valor
k_{no}	0.9346
$k_{location}$	0.8782
$k_{quantity}$	0.9981
$k_{standard}$	0.7954

Cuadro 6-12. Ajuste del modelo en el sector Tocarón (DEM SRTM).

	Estadístico	Valor
Ajuste del modelo	$-2LnL_0$ (sólo intercepto)	4 232.1966
	$-2LnL_m$ (intercepto+covariables)	2 884.4108
	Chi ²	1 347.7858
	Grados de libertad (*)	72
	Significancia (p)	0.00
	Pseudo R ² (McFadden)	0.3185
Clasificación	Celdas correctas (%)	71.04
	Cramer's V	0.3576

(Se utilizaron 18 variables independientes, ya que la variable **EXC** tiene valor cero en todo el sector).

Cuadro 6-13. Índices de concordancia (*Capacidad de Uso/Predicción*) en el sector Tocarón (DEM SRTM).

Índice	Valor
k_{no}	0.6380
$k_{location}$	0.5776
$k_{quantity}$	1.0248
$k_{standard}$	0.4189

En el sector La Peña, el ajuste del modelo generó los estadísticos mostrados en el Cuadro 6-14, para las mismas variables independientes del modelo regional. Los resultados de la validación de este modelo se muestran en el Cuadro 6-15 y la comparación de la predicción derivada del modelo, con el mapa de *Capacidad de Uso* de Referencia en el sector, se muestra en la Figura 6-13.

Cuadro 6-14. Ajuste del modelo en el sector La Peña.

	Estadístico	Valor
Ajuste del modelo	$-2LnL_0$ (sólo intercepto)	33 283.7355
	$-2LnL_m$ (intercepto+covariables)	15 202.6553
	Chi ²	18 081.0802
	Grados de libertad	76
	Significancia (p)	0.00
	Pseudo R ² (McFadden)	0.5432
Clasificación	Celdas correctas (%)	76.59
	Cramer's V	0.5839

Cuadro 6-15. Índices de concordancia (*Capacidad de Uso/Predicción*) en el sector La Peña.

Índice	Valor
k_{no}	0.7207
$k_{location}$	0.6982
$k_{quantity}$	1.0482
$k_{standard}$	0.6177

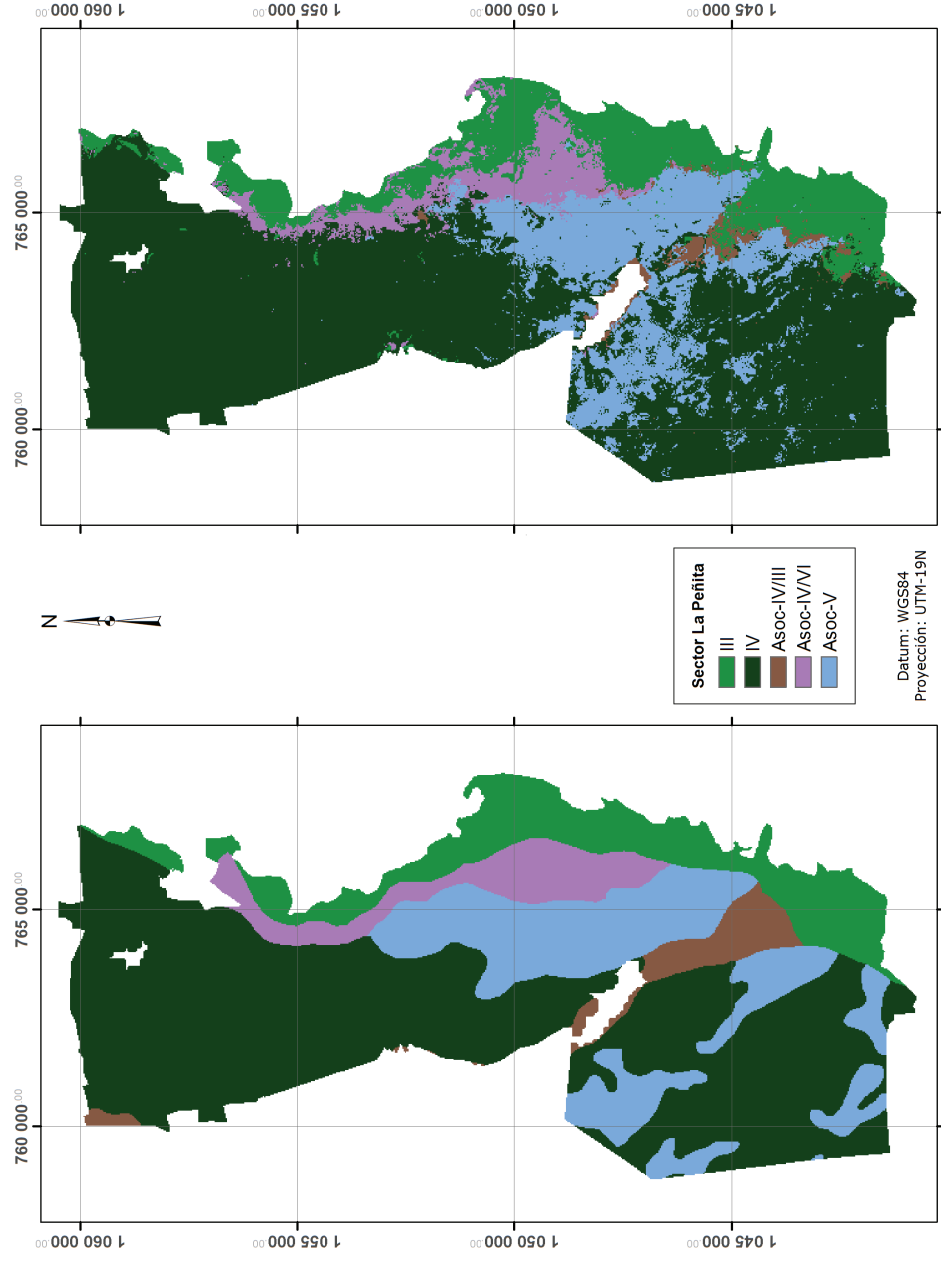


Figura 6-13. Capacidad de Uso de la Tierra del sector La Peña y Predicción del modelo.

6.3. MODELO DE GEOPROCESAMIENTO PARA LA PREDICCIÓN DE LA VOCACIÓN DE USO DE LA TIERRA

Se desarrolló una metodología para la determinación de la *Vocación de Uso de la Tierra* a partir de un conjunto de geoprocesos que permiten obtener una aproximación de este indicador a escala regional (1:100.000 a 1:250.000) en condiciones de limitada disponibilidad de información. La metodología se sintetiza en el diagrama de la Figura 6-14.

El procedimiento para la determinación de la *Vocación de Uso de la Tierra*, descrito en la Figura 6-14, requiere la determinación de seis componentes principales, definidos en el modelo legislativo sintetizado en la Figura 2-1.

6.3.1. Componentes de la Vocación de Uso

Los componentes de la *Vocación de Uso de la Tierra*, tal como es definida en el modelo legislativo venezolano, son los siguientes:

6.3.1.1. Capacidad de Uso de la Tierra (PCU)

Este elemento se puede obtener de la información edafológica disponible en estudios previos, de estudios de suelos realizados para esta finalidad, según las estipulaciones de la LTDA (Apéndice 1), o mediante estimaciones derivadas del modelo de predicción propuesto en la sección anterior.

6.3.1.2. Requerimientos agroecológicos de los cultivos (RC)

Este componente se obtiene de estudios de locales de adaptabilidad de cultivos o de la zonificación de cultivos realizada por las instituciones del sector agrícola. Se debe hacer su determinación para cada cultivo o agrupación de cultivos, bajo cada condición agroecológica particular del Estado.

6.3.1.3. Planes agrícolas nacionales, regionales y locales (PA)

Estos planes son formulados por las instituciones públicas con responsabilidad en el sector agrícola en los diferentes niveles administrativos. Estos planes deben establecer los rubros o grupos alternativos de cultivos que corresponden a las distintas clases de tierras, según las estipulaciones de la LTDA y los planes nacionales de seguridad alimentaria.

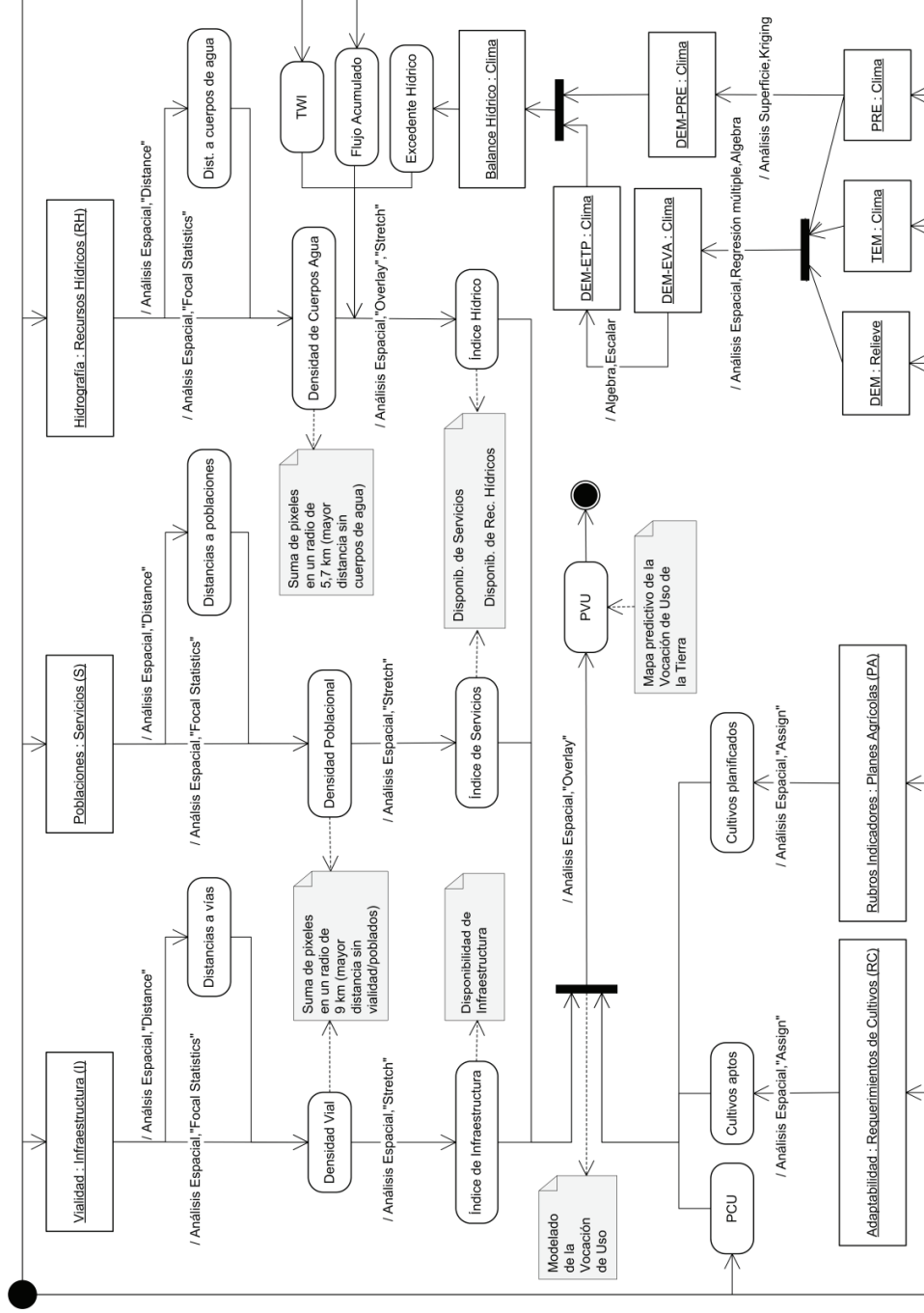


Figura 6-14. Modelo de geoprocesamiento propuesto para la determinación de la Vocación de Uso de la Tierra.

6.3.1.4. Disponibilidad de recursos hídricos (*Índice Hídrico*)

Este componente implica el inventario de los recursos hídricos disponibles al nivel de las unidades de producción, para la determinación de la superficie regable o susceptible de regar (área bajo cota de agua). Los recursos hídricos a considerar comprenden la disponibilidad neta de agua superficial factible de aprovechar, la capacidad neta de almacenamiento con fines de riego en obras de embalse, el rendimiento neto de acuíferos y el rendimiento de la red de pozos subterráneos. Ante la carencia de este tipo de información o la dificultad para su obtención, se propone generar un índice estimador (*Índice Hídrico*), basado en cuatro variables geomorfométricas para las que se ha adoptado igual peso ponderado. Estas variables se re-escalan entre 0 y 1 para su comparación e integración en el *Índice Hídrico*. Las cuatro variables del índice son:

- *Excedente Hídrico Anual (EXC)* (Figura 6-9). Esta variable le da preponderancia al factor clima en relación a los otros factores formadores del suelo y con ella se pretende tomar en cuenta los orígenes del flujo de escorrentía. Es un producto del Balance Hídrico, por lo que al considerarla se está tomando en cuenta la distribución espacial de la Precipitación, la Evapotranspiración y la Capacidad de Almacenamiento de Humedad del Suelo. Su valor en cada celda es una representación simplificada del ciclo hidrológico local que transmite una idea de la distribución espacial del escurrimiento excedentario, susceptible de aprovecharse con fines de riego. El excedente de humedad se obtiene de acuerdo al procedimiento establecido en el Capítulo 5, el cual es sintetizado en la Figura 6-14.
- *Índice Topográfico de Humedad (TWI)* (Figura 6-6). Esta variable toma en cuenta la tendencia del suelo a generar escorrentía como consecuencia de su topografía. Está principalmente relacionada con el factor relieve, particularmente con la altimetría.
- *Acumulación de Flujo (ACU)* (Apéndice 7). Con esta variable, también relacionada con el factor relieve, se toma en consideración la variabilidad local del escurrimiento superficial y subterráneo, como consecuencia de los cambios en el tamaño de las cuencas hidrográficas que acumulan la superficie de escurrimiento potencial.
- *Densidad de Cuerpos de Agua (DCA)* (Figura 6-15). Esta variable toma en cuenta la cantidad de cuerpos de agua, tanto poligonales (lagos, lagunas y embalses) como lineales (ríos y quebradas), que existen por unidad de referencia superficial. La unidad

de referencia considerada es una circunferencia de radio igual a la distancia existente entre una celda de cuerpo de agua y la celda de terreno (no cuerpo de agua) más alejada. Para esta variable componente del *Índice Hídrico*, se está asumiendo el criterio de que las unidades de producción agrícola (celdas) que tengan mayor cantidad de cuerpos de agua en su territorio de influencia, tendrán una mayor disponibilidad potencial de este recurso superficial.

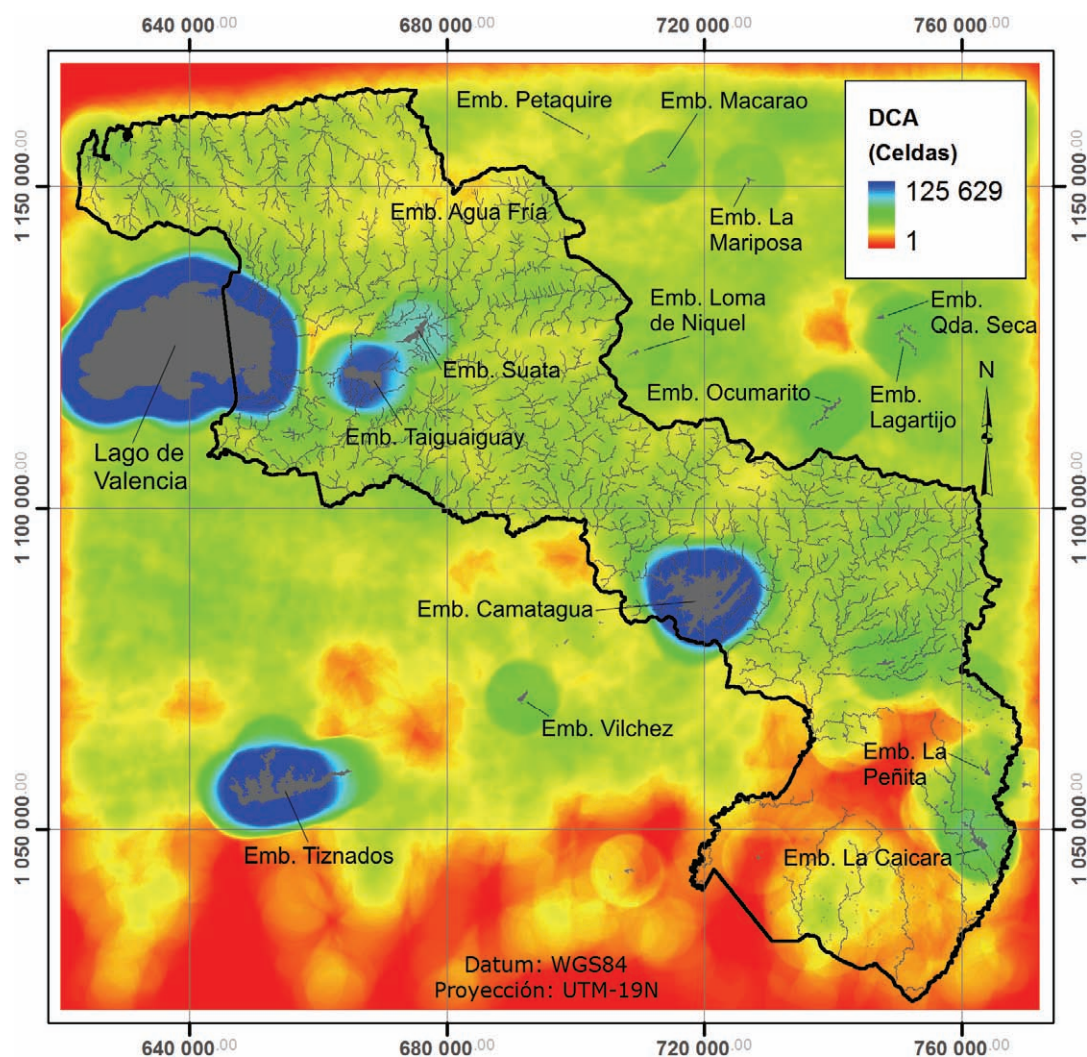


Figura 6-15. Densidad de Cuerpos de Agua (DCA) en un radio de búsqueda de 5.7 km.

Para obtener esta variable se sigue el siguiente procedimiento:

- o Se extrae la *Red de Drenaje* del DEM, utilizando como umbral de inicio un área aportante (**ACU**) mayor de 50 ha. Este criterio produjo una red visualmente similar a la red representada en la cartografía básica 1:100.000. En este procedimiento se emplea el algoritmo D8 (O'Callaghan y Mark, 1984).
- o Se digitalizan los polígonos de agua superficiales (lagos, embalses, lagunas y prestamos), incluyendo aquellos ubicados en los Estados vecinos.
- o Se integran la red de drenaje y los polígonos de agua en una capa Booleana (0 = sin cuerpos de agua, 1 = con cuerpos de agua).
- o Se calcula una capa de distancias, medidas desde la capa Booleana *Cuerpos de Agua*.
- o Se extrae la distancia existente entre los cuerpos de agua y la celda más alejada sin cuerpos de agua (este valor resultó en 5.7 km para el área de estudio). La distancia obtenida constituye el radio de búsqueda que se debe usar en la ventana móvil de cálculo para el siguiente paso del proceso.
- o Se calcula, para cada celda de la imagen Booleana *Cuerpos de Agua*, la sumatoria de celdas correspondientes a cuerpos de agua (celdas con valor 1) dentro de la ventana móvil circular, con el radio de búsqueda obtenido (Figura 6-16). Para este fin se utiliza la herramienta Estadística Focal del software ArcGIS. Las celdas que tengan mayor valor de la sumatoria, tendrán mayor cantidad de celdas que representan cuerpos de agua en su área de influencia (5.7 km).

Con esta variable se está tomando en cuenta la posición espacial de las celdas, en relación con la hidrografía, y su potencial para el aprovechamiento del recurso hídrico superficial.

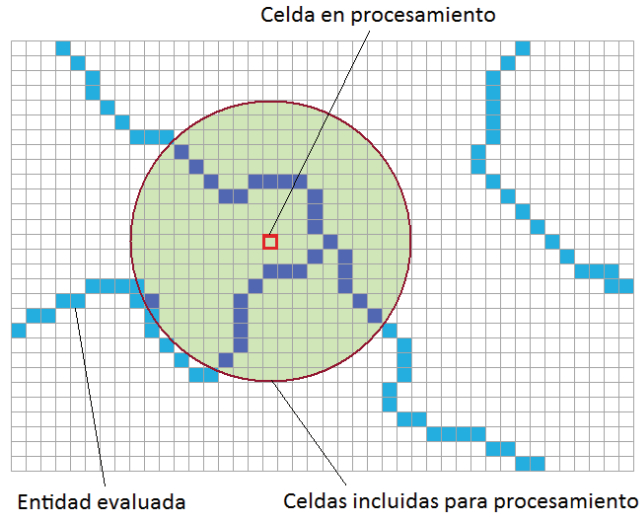


Figura 6-16. Procedimiento de cálculo para obtener la Densidad de Cuerpos de Agua.

Cada una de las cuatro variables, *Excedente Hídrico Anual*, *Índice Topográfico de Humedad*, *Acumulación de Flujo* y *Densidad de Cuerpos de Agua*, se re-escalan entre 0 y 1, mediante la expresión:

$$I_{Nuevo} = Min_{Nuevo} + \left[\frac{(I_{Viejo} - Min_{Viejo})}{Rango_{Viejo}} * Rango_{Nuevo} \right] \quad (6.3)$$

Donde:

I_{Nuevo} es el nuevo valor del índice (o variable del índice) escalado entre 0 y 1,

I_{Viejo} es el valor del índice en su escala original,

$Min_{Nuevo} = 0$,

Min_{Viejo} es el mínimo valor del índice en su escala original,

$Rango_{Nuevo} = 1 - 0 = 1$,

$Rango_{Viejo}$ es el rango entre el máximo y el mínimo valor del índice en su escala original.

El *Índice Hídrico (IH)* se obtiene integrando las cuatro variables, de acuerdo a la expresión:

$$IH = Exc + TWIS + A + DCA \quad (6.4)$$

El resultado se re-escala entre 0 y 1, utilizando la Ecuación 6.3, para poder integrarlo posteriormente al *Índice de Vocación de Uso* de la Tierra. El valor 0 del *Índice Hídrico* representa las celdas que tienen disponibilidad nula del recurso hídrico y el valor 1 la máxima disponibilidad, en el ámbito de la región de estudio (Figura 6-17).

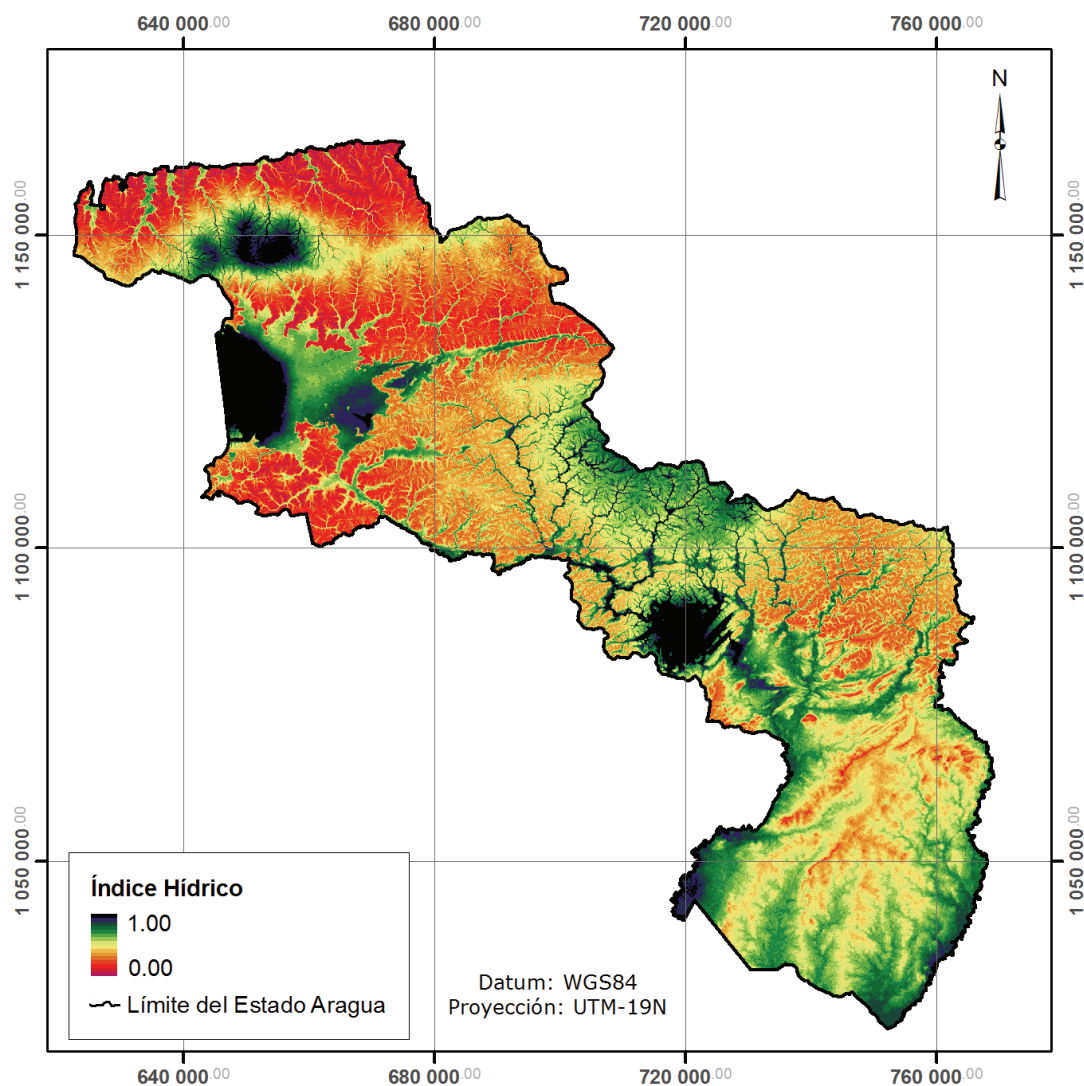


Figura 6-17. Índice Hídrico para la estimación de la disponibilidad potencial de recursos hídricos.

Validación parcial del *Índice Hídrico*:

En la zona de estudio y estados vecinos se localiza una serie de embalses multipropósito (Figura 6-15) que disponen de información hidro-climática recolectada para la elaboración de sus respectivos proyectos y para su operación. La información disponible de mayor relevancia a fines de evaluar el *Índice Hídrico* y sus variables componentes es el *Escorrentamiento Medio Anual (EMA)* (MINAMB, 2009; Abarca y Bernabé, 2008a; Abarca, 1998).

Se determinó la relación entre las cuatro variables seleccionadas para la construcción del *Índice Hídrico*, con el **EMA**, en las cuencas de captación de estos embalses. Para ello se determinó la cuenca de escurrimiento de cada embalse, mediante el DEM, y se extrajo la sumatoria del valor de cada variable del índice, en cada cuenca hidrográfica. Se seleccionó el estadístico suma, tomando en cuenta que el **EMA** corresponde a la totalización (suma) del flujo superficial proveniente de cada celda individual y que es descargado en el punto de salida de la cuenca en promedio al año.

Las características de las cuencas de los embalses y otros puntos de escurrimiento evaluados, así como el valor correspondiente a cada variable del *Índice Hídrico* se presentan en el Cuadro 6-16.

A partir de los valores del Cuadro 6-16 se determinó la correlación entre el **EMA** y las variables **EXC**, **ACU**, **TWI** y **DCA**, obteniéndose un R^2 de 88.50% ($p=0.0056$) con el siguiente modelo de regresión múltiple:

$$EMA = 1390.4371 + 194.3011 * \ln(EXC) + 78.3058 * \ln(ACU) - 297.266 * \ln(TWI) - 8.1824 * \ln(DCA) \quad (6.5)$$

Este ajuste determina que las variables seleccionadas para la confección del *Índice Hídrico* son buenas predictores del *Escorrentamiento Medio Anual* en las cuencas hidrográficas evaluadas y por lo tanto buenas estimadora de la disponibilidad de recursos hídricos en la región.

Cuadro 6-16. Caracterización del Índice Hídrico en cuencas hidrográficas del área de estudio.
Fuente: MINAMB (2009), Abarca y Bernabé (2008a).

Cuenca	Embalse (Sitio aforo)	Superficie vaso (ha)	Superficie cuenca (ha)	Escurrimiento Medio Anual		Variables componentes del Índice Hídrico (Suma de celdas)			
				Hm3	m3/s	EXC	ACU	TWI	DCA
Río Guárico	Camatagua	7 648.35	2 185.00	390.50	12.38	13 826.44	87 923.37	262 266.16	54 091.21
Río Lagartijo	Lagartijo	451.00	302.00	138.44	4.39	5 422.18	58 613.99	109 288.55	22 901.45
Río Ocumarito	Ocumarito	75.00	132.00	55.50	1.76	788 819.38	7 444 648.50	32 620 956.00	13 429 863.00
Río Petaquire	Petaquire	18.50	34.20	8.99	0.29	200 375.55	871 891.38	3 970 524.00	889 340.06
Río Macarao	Macarao	46.00	94.00	12.61	0.40	42 878.55	459 439.94	1 600 240.38	335 492.47
Río Aragua	Suata	849.80	198.00	22.60	0.72	5 764.21	187 237.00	474 665.56	85 075.93
Lago Valencia	Taiguaiguay	2 033.99	198.00	19.69	0.62	15 267.48	534 137.56	1 237 694.38	234 582.20
Río Tiznados	Tiznados	7 428.00	1 490.00	428.89	13.60	54 775.34	1 445 815.63	3 343 997.00	664 749.31
Río Vilchez	Vilchez	143.00	62.50	9.78	0.31	68 575.89	1 749 652.50	4 978 153.00	1 446 711.75
Río El Limón	Estación Forestal	-	18.63	20.18	0.64	530 745.81	4 045 585.75	25 039 046.00	3 493 724.25
Río El Limón	Qda. El Manguito	-	7.60	7.01	0.22	30 077.15	134 555.33	1 407 214.75	211 058.64

6.3.1.5. Disponibilidad de infraestructura (Índice de Infraestructura)

Este componente pretende estimar la disponibilidad de infraestructura de apoyo a la producción, que incluye obras de gran extensión longitudinal y superficial, como vialidad agrícola, para la movilización de insumos y productos, y las obras de riego, drenaje y saneamiento de tierras, para la aplicación de la tecnología del riego y la mecanización agrícola, así como obras de localización puntual, como centros de acopio y procesamiento de productos agrícolas (silos, plantas procesadoras y otros).

Se propone hacer una estimación de esta variable mediante un índice derivado de la contabilización de celdas con elementos de vialidad (*Densidad Vial*), utilizando la herramienta de Estadística Focal. Con este índice se utiliza el mismo procedimiento empleado para obtener la *Densidad de Cuerpos de Agua*, descrito anteriormente (Figuras 6-14 a 6-16).

Se utiliza la capa Vialidad ya que ésta es una entidad de fácil obtención a partir de la cartografía básica y es un indicador de la existencia de otras obras de infraestructura o de la facilidad de acceso a ellas. El radio de búsqueda para el algoritmo de cálculo es de 9 km, determinado mediante el cálculo de distancias sobre la capa *Vialidad*. La capa de *Densidad Vial* se re-escala a valores entre 0 y 1, utilizando la Ecuación 6.3, para obtener el *Índice de Infraestructura* (Figura 6-18).

6.3.1.6. Disponibilidad de servicios de apoyo a la producción (Índice de Servicios)

Este componente se refiere a la disponibilidad de insumos y servicios de apoyo a la producción, tales como mano de obra, mecanización, semillas, agrocontroladores, mercados y asistencia técnica. Estos elementos socio-económicos del ciclo de producción agrícola están asociados directamente con la existencia de empresas comerciales y agroindustriales, cooperativas de servicio y producción, instituciones agrícolas y consumidores, en su mayoría localizadas en los principales núcleos poblacionales del Estado. Ante la carencia de información de estos parámetros, se plantea estimar el componente mediante un índice derivado de la contabilización de celdas pertenecientes a núcleo poblados, localizadas en una ventana móvil de cálculo, mediante la herramienta Estadística Focal, tal como se procedió en los puntos anteriores (Figuras 6-14 a 6-16). El radio de búsqueda calculado para obtener la *Densidad Poblacional* es de 9 km.

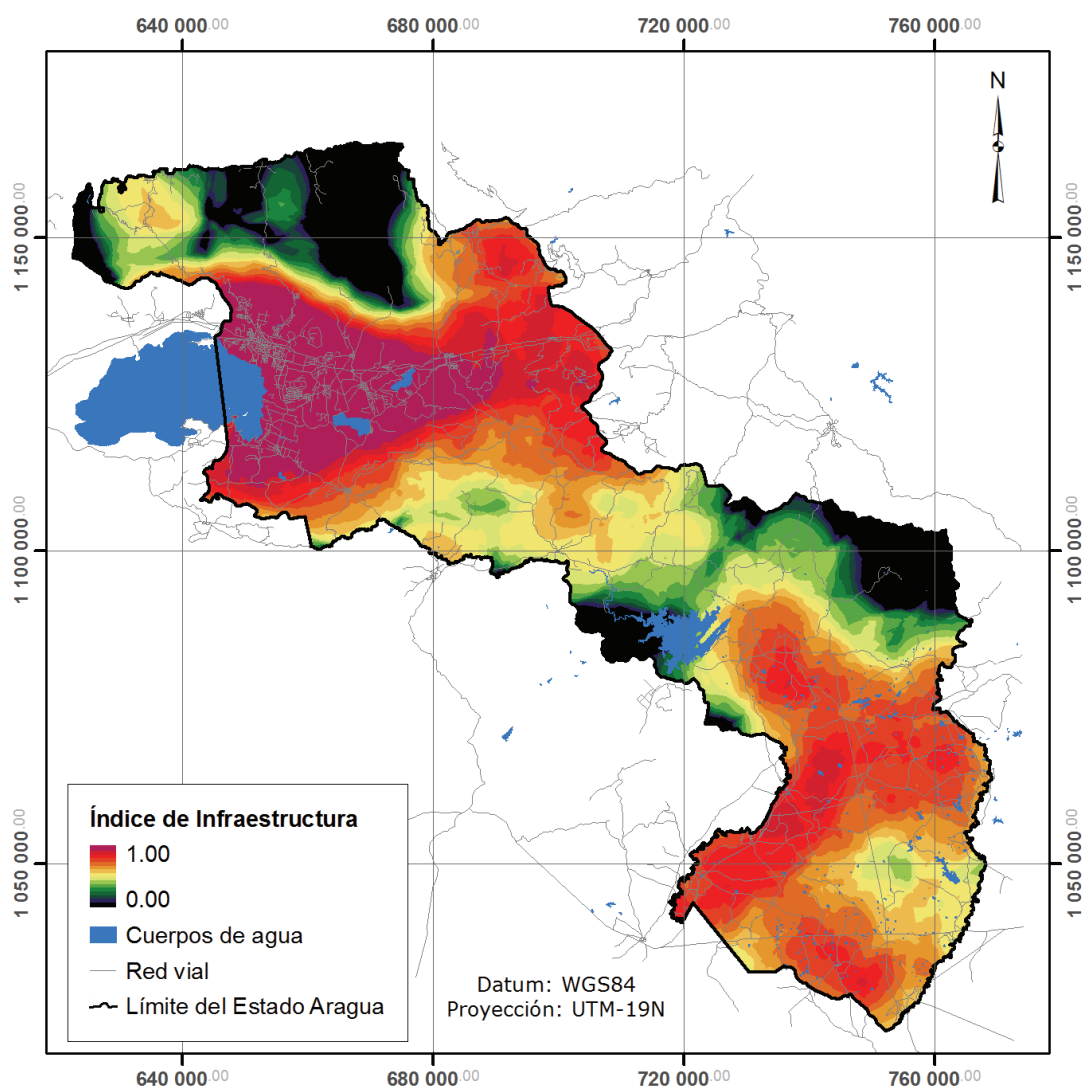


Figura 6-18. Índice de Infraestructura para la estimación de la disponibilidad potencial de infraestructura de apoyo a la producción agrícola.

Se evaluó la relación entre el tamaño de la población (Parroquias) y la superficie de los núcleos poblados (capitales parroquiales) del área de estudio, determinándose una tendencia lineal positiva con un R^2 de 65.50% ($p=0.0001E-9$). El modelo ajustado se presenta en la Figura 6-19. En correspondencia con esta relación, se espera que los núcleos poblados de mayor tamaño y las zonas con mayor concentración de núcleos poblados tengan mayor población, mayor disponibilidad de mano de obra y de insumos y servicios de apoyo a la producción agrícola.

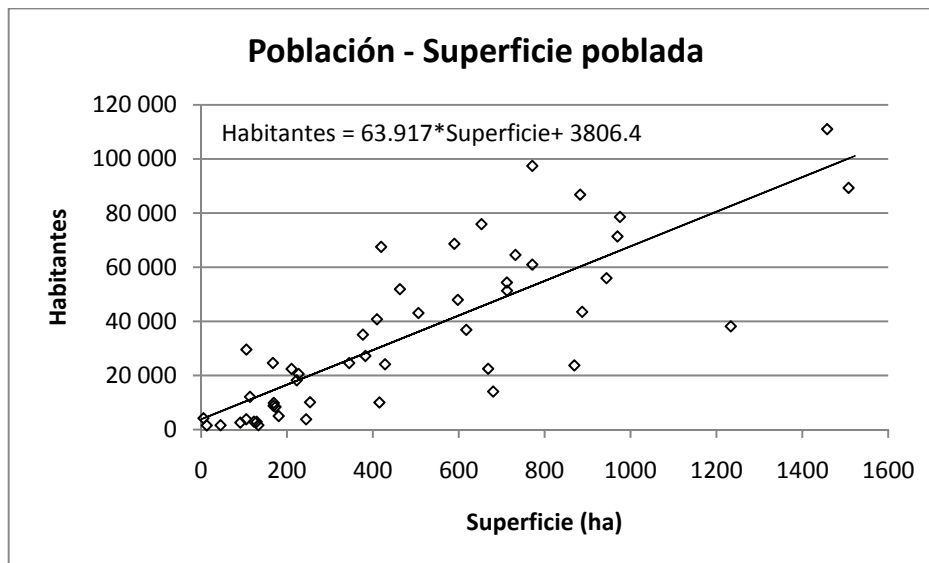


Figura 6-19. Relación entre el número de habitantes y la superficie de las Parroquias del Estado Aragua.

Para el *Índice de Servicios* se está adoptando el criterio de que las unidades de producción (parcelas) con mayor conteo de celdas pertenecientes a núcleos poblados en su ventana de búsqueda (*Densidad Poblacional*), tienen mayor posibilidad de contar con insumos y servicios, lo que se traduce en una mayor *Vocación de Uso*. La capa de *Densidad Poblacional* se re-escala a valores entre 0 y 1, mediante la Ecuación 6.3, para obtener el *Índice de Servicios* (Figura 6-20).

6.3.2. Integración de los componentes de la Vocación de Uso

En la legislación no existe un procedimiento claramente establecido para definir rangos de valoración de los componentes de la *Vocación de Uso* y aplicar expeditamente el impuesto territorial. Por esta razón, se propone un método de cálculo en el que se asigna una puntuación variable entre 0 y 1 a cada uno de los seis componentes de la *Vocación*, los cuales posteriormente se integran en un *Índice de Vocación*. Tres componentes se integran de manera aditiva, ya que por su naturaleza son eventos incluyentes (Disponibilidad de Recursos Hídricos, Disponibilidad de Infraestructura y Disponibilidad de Servicios), y tres componentes se integran de manera multiplicativa, dado que son eventos mutuamente excluyentes en relación con el *Índice de Vocación* (Capacidad de Uso de la Tierra, Requerimientos Agroecológicos de los Cultivos y Planes Agrícolas).

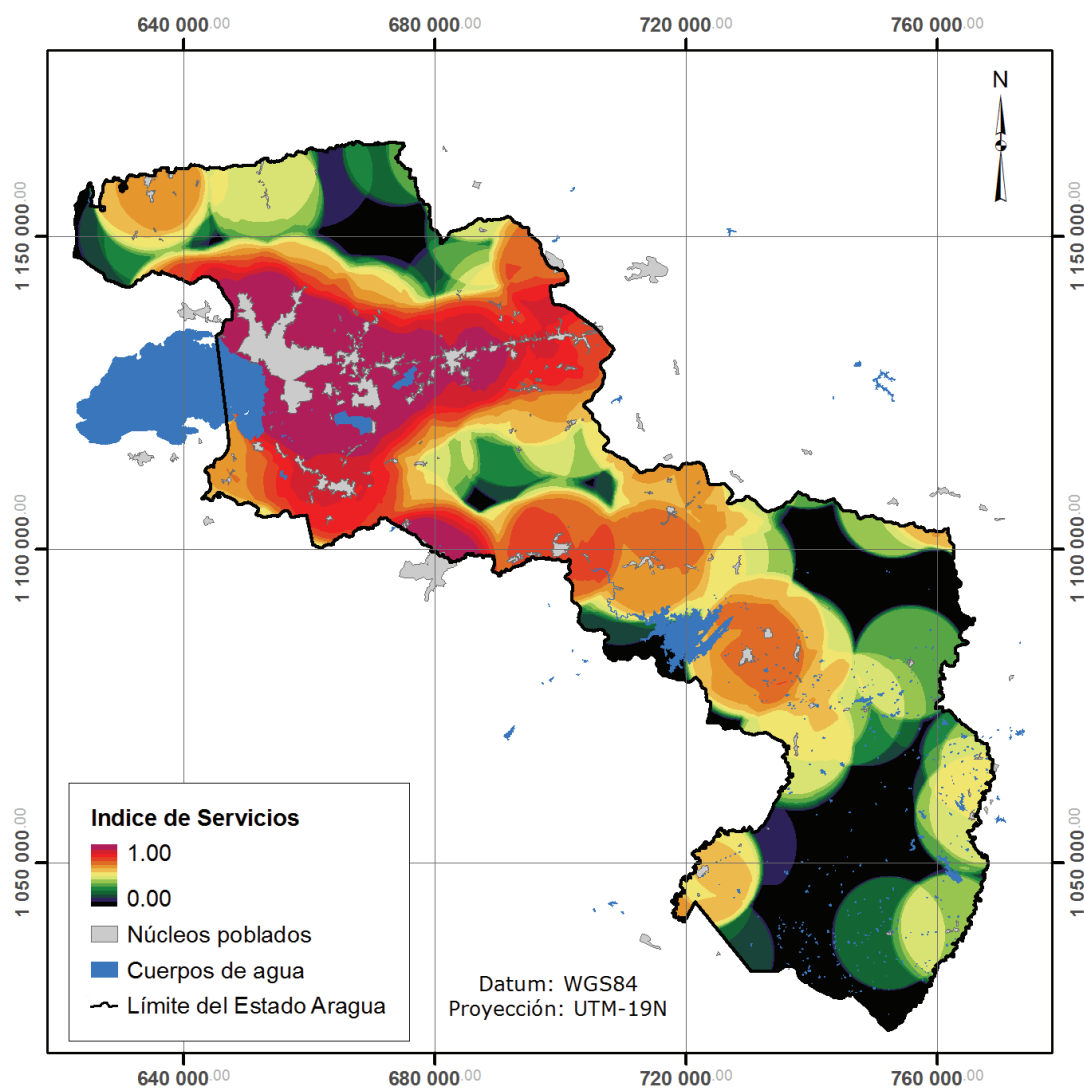


Figura 6-20. Índice de Servicios para la estimación de la disponibilidad potencial de insumos y servicios de apoyo a la producción agrícola.

Se dio igual peso a cada componente del índice para tratar de proceder con mínima subjetividad, considerando que la LTDA no destaca ningún componente en relación al resto.

Los componentes de la *Vocación de Uso*: Disponibilidad de Recursos Hídricos (estimado con el *Índice Hídrico*), Disponibilidad de Infraestructura (estimado con el *Índice de Infraestructura*) y Disponibilidad de Insumos y Servicios (estimado con el *Índice de Servicios*) tienen una variabilidad continua. Estos componentes se integran de manera aditiva en una variable también continua que se ha denominado *Índice de Agrosoporte*, resultando

con una escala entre 0 y 3, que se re-escala a valores entre 0 y 1 mediante la Ecuación 6.3 (Figura 6-21).

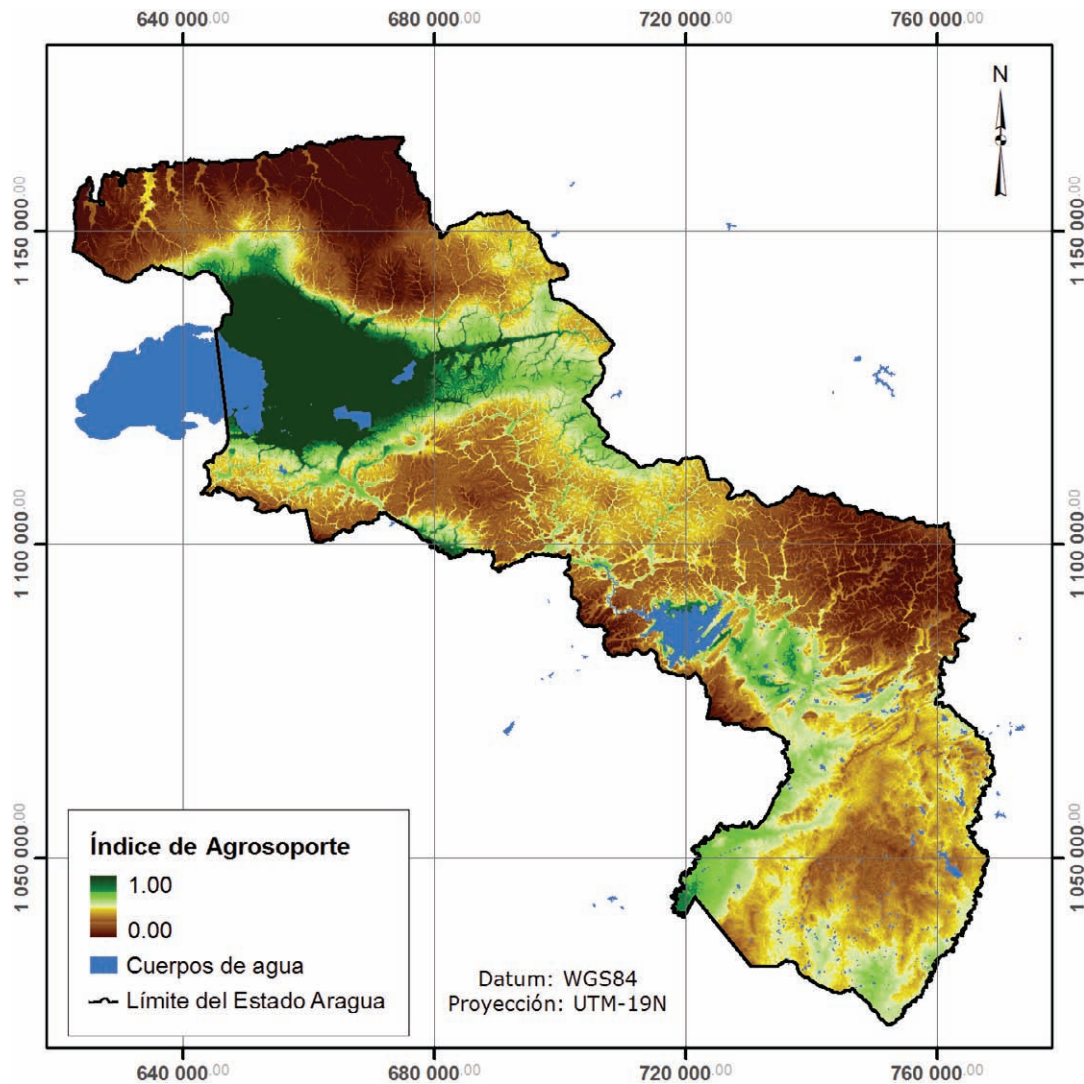


Figura 6-21. Índice de Agrosoporte, integrado por el Índice Hídrico, el Índice de Infraestructura y el Índice de Servicios.

El componente *Capacidad de Uso de la Tierra* tiene un carácter discreto de estructura Booleana. De acuerdo a la metodología original (Klingebiel y Montgomery, 1962) la *Capacidad de Uso* determina ocho categorías de clasificación. Los lotes de terreno a evaluar se ubicarán en alguna de esas categorías, y el rubro en producción del lote se adaptará o no a dicha categoría, según el criterio de adaptación establecido en la definición de Asignaciones de Uso presentado en la Figura 2-1, pudiendo en consecuencia tomar valores de 1 ó 0,

dependiendo si se el rubro se adapta o no a la categoría de *Capacidad de Uso* correspondiente. La *Capacidad de Uso* define la *Vocación* de manera excluyente (independientemente de los valores de sus otros componentes) por lo que se integra de manera multiplicativa al *Índice de Agrosoporte* para conformar parcialmente el *Índice de Vocación de Uso*.

El componente Requerimientos Agroecológico de los Cultivos puede tener una escala discreta, si en los estudios respectivos se han determinado niveles de adaptabilidad, o una escala continua, si se simulan parámetros como el rendimiento de los cultivos para definir la adaptabilidad con base en la heterogeneidad espacial. En cualquier caso los rubros o terrenos a evaluar deben recalificarse en una escala Booleana, con valores entre 0 ó 1, dado que es un evento mutuamente excluyente con relación a la *Vocación de Uso* (si un rubro no es adaptable, el valor de los otros componentes del *Índice de Vocación* es irrelevante). Este componente se integra de manera multiplicativa al *Índice de Agrosoporte* para conformar parcialmente el *Índice de Vocación*.

El componente Planes Agrícolas tiene un carácter discreto, pudiendo definirse niveles de adaptabilidad para el rubro o terreno a evaluar, en función de la importancia del rubro dada en los planes agrícolas. Estos niveles también deben recalificarse a valores Booleanos, por el carácter excluyente de la variable, integrándose de manera multiplicativa con los componentes anteriores para conformar finalmente el *Índice de Vocación*.

El *Índice de Vocación* en consecuencia puede variar en una escala continua entre 0 y 1. Cuando su valor es 0 absoluto, el rubro o lote de terreno no se adapta a la *Vocación* y está sujeto a las tarifas correspondientes del impuesto territorial y a las estipulaciones específicas de la LTDA. Cuando su valor es mayor a 0, hay adaptación a la *Vocación*, con niveles crecientes de adaptabilidad, hasta un máximo de 1, referidos estos niveles al grado de disponibilidad de recursos hídricos, infraestructura y servicios (Figura 6-22).

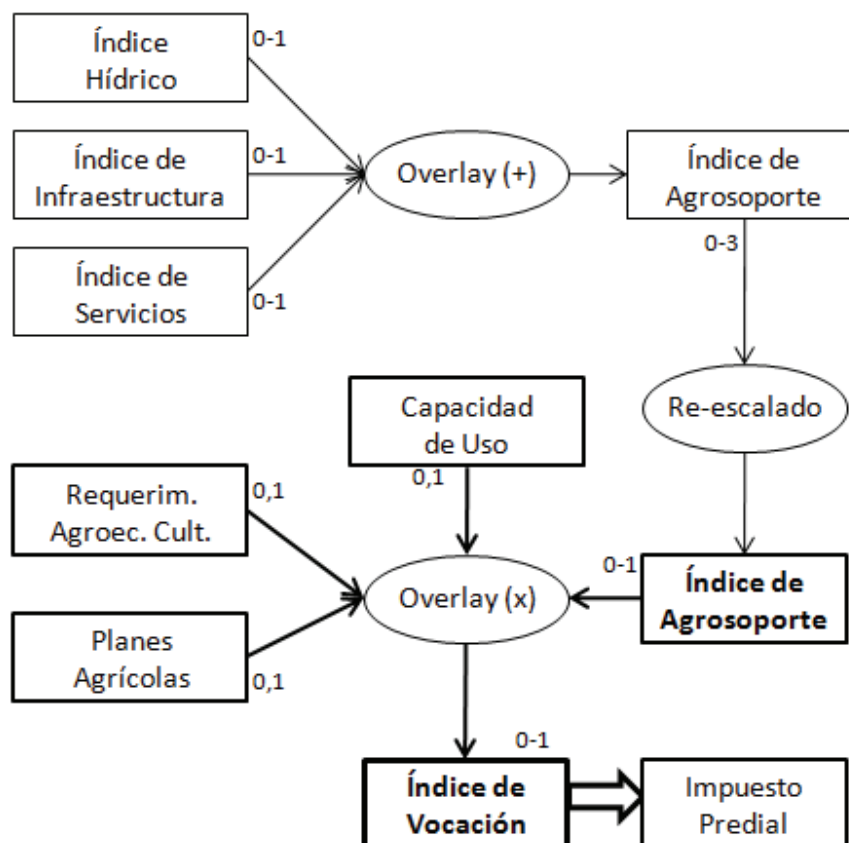


Figura 6-22. Superposición y escalado de los índices componentes de la Vocación de Uso.

6.4. MODELO DE GEOPROCESAMIENTO PARA LA APLICACIÓN DEL IMPUESTO TERRITORIAL

6.4.1. Método de evaluación de la base imponible

Se analizaron las estipulaciones y procedimientos establecidos en la LTDA (ANRBV, 2005) y su Reglamento Parcial (RBV, 2005) para la implementación del Impuesto Territorial, desarrollándose el diagrama presentado en la Figura 6-23. Un elemento clave para la definición del tributo es la *Vocación de Uso de la Tierra*, ya que si un predio o lote de un predio no se adapta a la clase de *Vocación de Uso* correspondiente, su productividad a efectos de tributación es nula, independientemente de su volumen de producción real (ver la primera caja de decisión en la Figura 6-23).

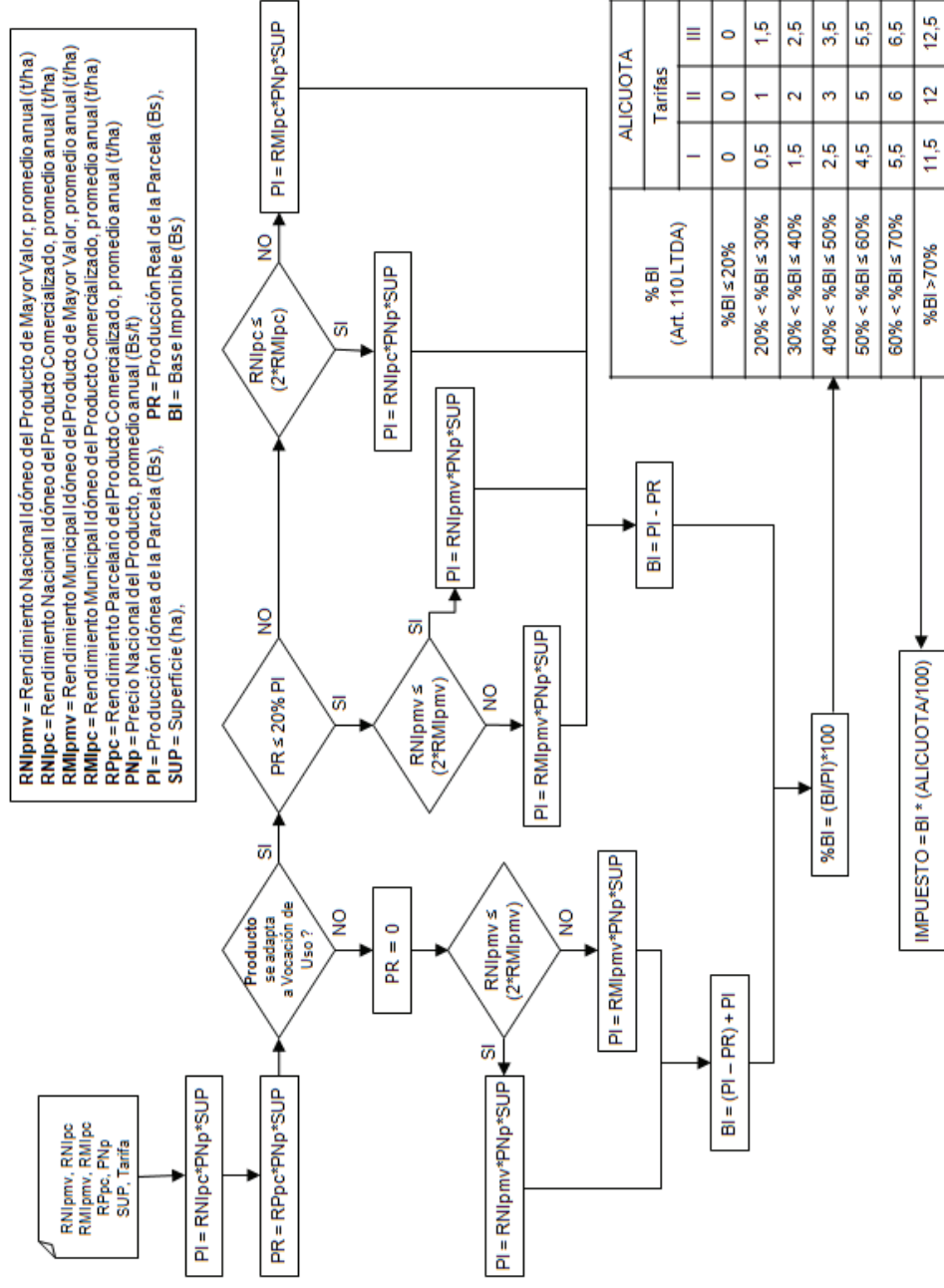


Figura 6-23. Modelo legislativo para la determinación del Impuesto Predial en Venezuela. Fuente: Adaptado de LTDA (ANRBV, 2005).

Con base en los modelos de geoprocesamiento desarrollados para estimar la *Capacidad y Vocación de Uso*, las tierras que tengan un *Índice de Vocación* de 0 absoluto se consideran sin *Vocación de Uso* para el rubro en evaluación y la base imponible del impuesto será la más alta, de acuerdo al procedimiento esquematizado en la Figura 6-23.

A efectos de evaluar la aplicación del procedimiento del impuesto territorial en casos reales del área de estudio y utilizando la información derivada de los geoprocesos desarrollados para la evaluación de la *Capacidad y Vocación de Uso de las Tierras*, se calculó la tasa de impuesto para varias parcelas agrícolas localizadas en los sectores Tocarón y La Peñita de las Áreas de Referencia (Figura 4-2). La información catastral de estos sectores fue levantada durante los trabajos de campo realizados conjuntamente con la Comisión de Tierras del Estado Aragua (CEAEA, 2005) (Apéndice 2). En relación a las variables de productividad agrícola, sólo se dispone de información relativa a los usos de la tierra, por lo que se han tomado los registros de productividad nacional correspondientes a esos usos y se han adoptado valores adecuados para la productividad municipal y parcelaria, de forma que se pudieran evaluar las diferentes opciones de cálculo del algoritmo del impuesto territorial (Figura 6-23) en cada una de las fincas seleccionadas. Se seleccionaron parcelas con uso homogéneo de la tierra, para simplificar los cálculos y sólo con usos agrícolas.

El indicador de adaptabilidad agroecológica de los cultivos se determinó a partir de estudios realizados en la zona (Viloria y Núñez, 2008; Cortez et al., 2007; Benacchio, 1982; Benacchio et al., 1982), redefiniendo los niveles de adaptabilidad para que adoptaran puntuaciones de 0 ó 1: a la adaptabilidad alta y media, se le asignó un valor de 1, y a la adaptabilidad baja y no adaptable, un valor 0.

El indicador correspondiente a los planes agrícolas se determinó con base en el Plan Agrícola Nacional (MAT, 2007), el cual define los cultivos de mayor prioridad catalogándolos como rubros bandera y rubros estratégicos. A estos rubros se asignó un valor de 1 y a los otros rubros un valor de 0.

En las Figuras 6-24 y 6-25 se identifican las parcelas seleccionadas para el cálculo demostrativo del impuesto territorial. En los Cuadro 6-17 y 6-18 se muestran los resultados obtenidos.

En el Capítulo 2 se hacía referencia a la escala de los estudios de suelo, determinándose que la aplicación de los procedimientos de predicción de la Capacidad de Uso, partiendo de

datos conocidos a escala 1:100.000, tiene validez para unidades de planificación mayores de 160 ha. Por tal razón los procedimientos de cálculo del impuesto predial en fincas con superficies menores a esta superficie de referencia sólo tienen una finalidad demostrativa. Los resultados pueden servir de referencia, para estimación de la tributación a nivel de planificación, pero para fines de valoración tributaria formal, en fincas menores a esta superficie, se requiere la determinación de la *Capacidad y Vocación de Uso* a una escala más detallada (1:25.000).

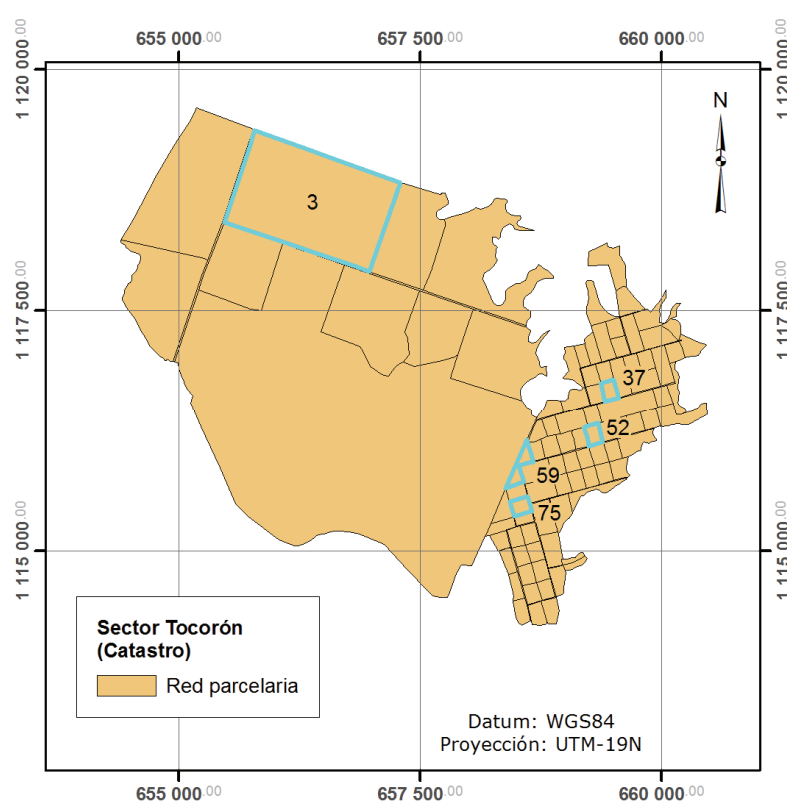


Figura 6-24. Parcelas del Sector Tocarón, seleccionadas para la evaluación del cálculo del impuesto territorial.

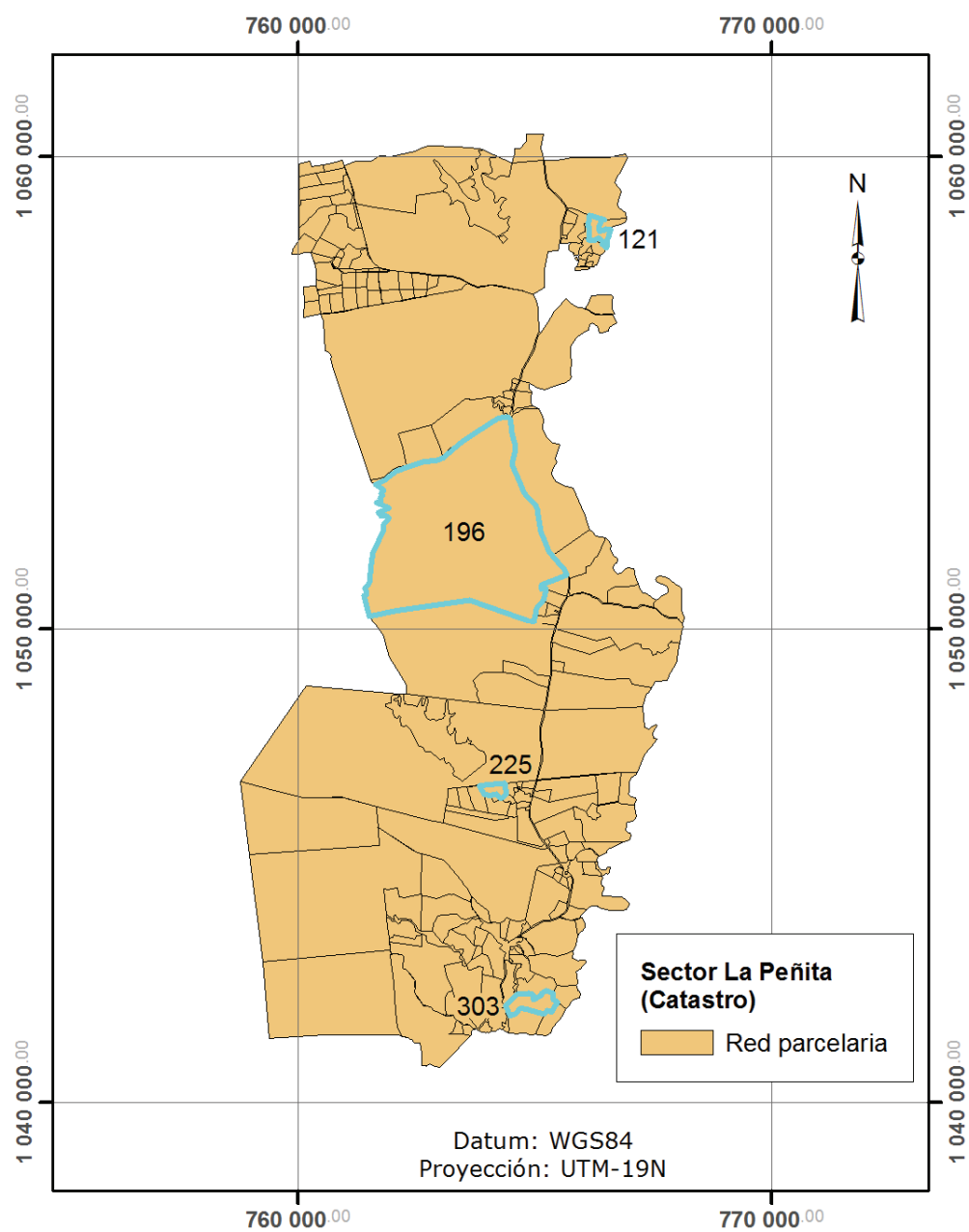


Figura 6-25. Parcelas del Sector La Peñita, seleccionadas para la evaluación del cálculo del impuesto territorial.

Cuadro 6-17. Síntesis de datos para la valoración productiva en parcelas seleccionadas del área de estudio.

Datos Catastrales												
Sector de Referencia	Tocorón						La Peñita					
Asentamiento	Tocorón	La Molinera					La Anguila-La Mula					
Código SIG (Data Value)	3	52	37	75	59	303	225	196	121			
N°/Nombre Parcela	9	47	67	25	42	S/N	Arroyo Negro	Dos Caminos	S/N			
Superficie (Ha)	158.54	3.01	2.79	3.09	4.31	35.16	11.89	1 144.33	16.96			
Ocupante	Sucesión Irrizarry	José Pérez	Jesús Díaz	Yolanda Picolli	Luis Delgado	Juana Gómez	Flia. Monctezuma	Manuel Méndez	Pablo Rojas			
Uso (2005)	Caña de Azúcar	Maíz	Limón	Maíz	Aguacate	Maíz	Maíz	Sorgo	Lechosa			
Valoración productiva												
Capacidad de Uso (Predicción)	III	IV	IV	III	III	III	V	IV	IV			
Adaptabilidad Agroecológica	Media-Alta	Media-Baja	Media	Media	Alta	Alta	Media	Media-Alta	Alta			
(+) Índice de Agrosoporte (0 – 1)	0.53	0.45	0.47	0.42	0.44	0.25	0.25	0.24	0.26			
(x) Índice Adaptab. Agroec. (0 / 1)	1	0	1	1	1	1	1	1	1			
(x) Índice Planes Agrícolas (0 / 1)	0	1	1	1	1	1	1	1	1			
(x) Índice de Capac. Uso (0 / 1)(*)	0	0	1	1	1	1	0	0	1			
(=) Índice de Vocación (0 – 1)	0	0	0.47	0.42	0.44	0.25	0	0	0.26			
Adaptación a Vocación de Uso	No	No	Si	Si	Si	Si	No	No	Si			

(*) Este índice se define en función de las Asignaciones de Uso de la Figura 2-1, para cada Uso (rubro) con relación a la clase de Capacidad de Uso predicha en la parcela (si el Uso se adapta a la clase de Capacidad, el Índice es 1, si no se adapta es 0).

Cuadro 6-18. Síntesis de datos para la valoración tributaria en parcelas seleccionadas del área de estudio.

Valoración tributaria												
	Datos básicos											
Sector de Referencia	Tocorón					La Peñita						
Código SIG (Data Value)	3	52	37	75	59	303	225	196	121			
RNIpmv (t/ha)	75.524	3.472	9.615	3.472	10.257	3.472	3.472	2.305	15.511			
RNIpc (t/ha)	75.524	3.472	9.615	3.472	10.257	3.472	3.472	2.305	15.511			
RMIpmv (t/ha)	80	1.6	10	1.6	5	4	4	1	20			
RMIpc (t/ha)	80	1.6	10	1.6	5	4	4	1	20			
RPpc (t/ha)	79	3.8	9.8	0.65	12	3.8	3.8	2.5	17			
PNp (BsF/kg) (año 2007)	0.764	0.747	0.528	0.747	1.64	0.747	0.747	0.453	0.79			
PI (BsF) (Estimada)	9 147 811.27	7 806.69	14 164.05	8 014.17	72 500.58	91 190.41	30 837.71	1 194 869.33	207 822.58			
20% PI (BsF)	1 829 562.25	1 561.34	2 832.81	1 602.83	14 500.12	18 238.08	6 167.54	238 973.87	41 564.52			
PR (BsF)	9 568 840.24	8 544.19	14 436.58	1 500.35	84 820.80	99 805.18	33 750.95	1 295 953.73	227 772.80			
Cálculo del impuesto predial												
PR (BsF)	0.00	0.00	14 436.58	1 500.35	84 820.80	99 805.18	0.00	0.00	227 772.80			
2*RMIpmv (t/ha)	160.00	3.20	20.00	3.20		8.00	8.00	2.00	40.00			
2*RMIpc (t/ha)	160.00	3.20	20.00	3.20	10.00	8.00	8.00	2.00	40.00			
PI (BsF)	9 147 811.27	3 597.55	14 164.05	3 693.17	35 342.00	91 190.41	30 837.71	518 381.49	207 822.58			
BI (BsF)	18 295 622.54	7 195.10	-272.53	2 192.82	-49 478.80	-8 614.76	61 675.43	1 036 762.98	-19 950.22			
%BI	200.00	200.00	0.00	59.38	0.00	0.00	200.00	200.00	0.00			
Alícuota (Tarifa II) (%)	12.00	12.00	0.00	5.00	0.00	0.00	12.00	12.00	0.00			
Impuesto (BsF)	2 195 474.70	863.41	0.00	109.64	0.00	0.00	7 401.05	124 411.56	0.00			
% (Impuesto/PR)	22.94	10.11	0.00	7.31	0.00	0.00	21.93	9.60	0.00			

6.4.2. Escenarios de tributación

Para evaluar el funcionamiento del algoritmo del impuesto en diferentes condiciones de productividad se seleccionaron dos de las parcelas caracterizadas en los Cuadros 6-17 y 6-18, la parcela de código 3, en el sector Tocarón y la parcela de código 303, en el sector La Peñita. Se tomaron los mismos parámetros de la valoración productiva indicados en el Cuadro 6-17. En relación a la valoración tributaria (Cuadro 6-18), se cambió el Rendimiento Municipal Idóneo (RM_{Ipmv}, RM_{Ipc}) para este análisis, adoptando las tasas de rendimiento indicadas por MAT (2007) para el estado Aragua, y se definieron varios escenarios de productividad para estas parcelas, las cuales se cultivan con caña de azúcar y maíz respectivamente. Las tierras de la finca de caña de azúcar no tienen vocación para este cultivo, mientras que la finca de maíz sí. Se plantea un escenario de alta productividad, adoptando tasas de rendimiento experimental obtenidas para genotipos promisorios de estos cultivos (Abarca y Bernabé, 2010a). Los otros escenarios plantean obtener los mismos rendimientos que a nivel municipal, a nivel nacional y a diferentes fracciones del rendimiento nacional (80%, 60%, 40%, 20%, 10% y 1%). Se aplicó el algoritmo del impuesto predial (Figura 6-23) y se obtuvieron los resultados presentados en la Figura 6-26 y en el Apéndice 18.

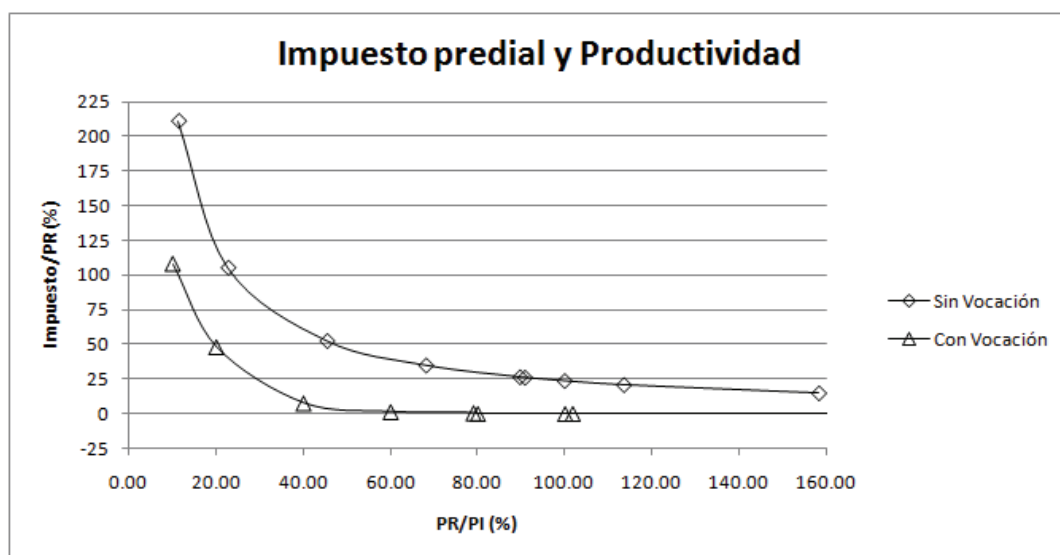


Figura 6-26. Simulación de escenarios de tributación predial en una finca de caña de azúcar (sin Vocación de Uso) y en una finca de maíz (con Vocación de Uso).

6.5. SÍNTESIS

En este capítulo se concretó la propuesta metodológica formulada en el Capítulo 1, con base en los fundamentos desarrollados en los capítulos 2 a 5. En síntesis se desarrollaron los siguientes aspectos:

1. **Selección y procesamiento de un DEM.** Con base en el análisis comparativo realizado entre imágenes SRTM y ASTER, se seleccionó el DEM derivado de la imagen radar SRTM.
2. **Obtención de variables geomorfométricas.** A partir del DEM seleccionado se derivaron 38 variables geomorfométricas en total (12 variables básicas, 15 variables hidrológicas y 11 variables topo-climatológicas).
3. **Desarrollo de un geoproceso para la predicción de la Capacidad de Uso de la Tierra.** Este proceso se basa en el ajuste de un modelo de regresión logística multinomial para lo cual se evaluaron las 38 variables geomorfométricas derivadas del DEM, resultando 19 de ellas estadísticamente significativas. El ajuste se realizó haciendo un muestreo aleatorio estratificado de 10% de las celdas de la variable dependiente (*Capacidad de Uso de la Tierra* en las Áreas de Referencia) y de las variables independientes (atributos geomorfométricos). El modelo tiene una bondad de ajuste moderada a escala regional (sobre todas las Áreas de Referencia en conjunto) ($R^2=0.48$). El ajuste mejora restringiendo el área de estudio a regiones eco-geográficas de mayor homogeneidad, siempre y cuando el factor relieve tenga una importancia destacada con relación a los otros factores formadores del suelo (en zonas de relieve accidentado se obtuvo un $R^2=0.76$ y $R^2=0.54$, mientras que en zonas de relieve plano el ajuste arrojó un $R^2=0.32$).
4. **Validación del modelo de Capacidad de Uso.** Se generó un mapa de predicción de la *Capacidad de Uso* para todas las Áreas de Referencia y se evaluó la matriz de contingencia y el índice de concordancia Kappa. A nivel global hay un 76% de concordancia predicción/realidad y a nivel local ésta varía entre 93 y 64%. Con el modelo ajustado y validado para todas las Áreas de Referencia se generó un mapa de *Capacidad de Uso* de todo el Estado Aragua, sin embargo no se dispone de información actualizada y chequeada en campo para su validación.
5. **Desarrollo de un geoproceso para la predicción de la Vocación de Uso de la Tierra.** Este se obtuvo a partir de seis componentes: Índice Hídrico, Índice de Infraestructura,

Índice de Servicios, Índice de Capacidad de Uso, Índice de Requerimientos Agroecológicos de los Cultivos e Índice de Planes Agrícolas, los cuales se integraron aditiva y multiplicativamente en un Índice de *Vocación de Uso*. Los índices Hídrico, de Infraestructura y de Servicios se derivaron de información disponible en la cartografía básica (red vial y red de centros poblados) y en variables geomorfométricas derivadas del DEM. Estos tres componentes integraron en un Índice de Agrosoporte el cual proporciona información cuantitativa distribuida sobre el potencial hídrico y socio-económico del área de estudio, información requerida para la valoración tributaria de los predios agrícolas y que, complementariamente, puede ser de utilidad en la planificación y el desarrollo de la actividad agrícola.

6. **Validación del Índice de Vocación de Uso.** Ante la limitada disponibilidad de información sobre los componentes socio-económicos y físico-naturales del índice, se evaluó cualitativamente su capacidad predictiva, comparando los resultados obtenidos con las observaciones de la situación actual en el área de estudio. El componente Índice Hídrico se evaluó cuantitativamente, comparando los resultados de su predicción con el Escurrimiento Medio Anual, conocido en algunos puntos del área, obteniéndose un resultado satisfactorio ($R^2=0.89$).
7. **Desarrollo de un geoproceto para el cálculo de la Tributación Territorial.** Se desarrolló un algoritmo para el cálculo del impuesto predial establecido en la legislación venezolana, a partir de la predicción de la *Vocación de Uso de la Tierra*.
8. **Validación del geoproceto de Tributación Territorial.** Se formularon escenarios alternativos de producción agrícola en fincas seleccionadas del área de estudio y se aplicó el procedimiento de tributación, comprobándose la proporción inversa entre la productividad de la tierra y la contribución tributaria, perseguida en la legislación.

CAPÍTULO 7

RESULTADOS Y CONCLUSIONES

7.1. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

7.1.1. Modelo de geoprocesamiento para la predicción de la Capacidad de Uso de la Tierra

7.1.1.1. Fuentes del DEM

La diferencia observada, tanto en la caracterización estadística implementada (Figura 6-3, Cuadro 6-1), como la evaluación visual realizada (Figuras 6-2 y 6-4), permite afirmar que el DEM obtenido por la misión SRTM se ajusta mejor a la realidad del terreno que el DEM generado por el satélite ASTER. El sector utilizado para la comparación (Cuenca Alta del Río El Limón) cubre un 2% de la superficie total del área de estudio, por lo que se debe hacer una evaluación más exhaustiva que incluya otros sectores de diferente configuración topográfica.

Las imágenes ASTER fueron liberadas recientemente para su distribución en Internet, pero en una versión sin pre-procesamiento por lo que contienen abundantes artefactos que dificultan su utilización.

Para la aplicación de la metodología desarrollada en esta investigación, el DEM derivado del SRTM es adecuado en la escala de trabajo propuesta (entre 1:250.000 y 1:100.000). El uso de un DEM derivado de mapas topográficos a escala 1:25.000 (sector Cuenca Alta del Río El Limón) no mostró mejores resultados en la capacidad predictiva del modelo ajustado (Cuadros 6-10 y 6-11 en comparación con los Cuadros 6-8 y 6-9). Hay que considerar que el ajuste del modelo se hizo en ambos casos con el mapa de *Capacidad de Uso* a escala 1:100.000 como variable dependiente. Se pudiera esperar un mejor ajuste del modelo y una mejor capacidad predictora sí, tanto la variable dependiente (*Capacidad del Uso*), como las variables independientes (geomorfometría derivada del DEM), correspondieran a una escala de mayor nivel de detalle (por ejemplo 1:25.000), pero esto debe ser evaluado.

El DEM derivado del mapa topográfico tiene el mejor ajuste al terreno, de acuerdo al análisis visual realizado mediante comparación con las ortofotos digitales del área. Esto es debido a que el mapa a curvas de nivel, que permitió la generación del DEM, es producido mediante restitución areofotogramétrica controlada con puntos plani-altimétricos levantados con mediciones geodésicas de campo, en comparación con las imágenes radar (SRTM) y ópticas (ASTER), afectadas por problemas de nubosidad y vegetación, entre otros. Sin

embargo, el proceso de interpolación sobre curvas de nivel, las diferencias en uniformidad del muestreo en este tipo de mapas y la generalización de las curvas de nivel, introducen otros errores que deben ser evaluados y para lo cual se requiere la comparación con un DEM derivado de procedimientos topográficos directos (altimetría convencional o GPS diferencial).

Si se cuenta con mapas topográficos digitales a escala 1:25.000 se deben utilizar como principal fuente para el modelo altimétrico, pero en la generación del DEM se deben incorporar los puntos de control terrestre disponibles en la cartografía, para densificar el muestreo en las áreas planas y en elementos del relieve como cimas, depresiones o líneas de quiebre de la pendiente. De esta manera se mitiga la aparición de artefactos indeseables en la interpolación del DEM. Si estos mapas no están disponibles, se debe usar el DEM SRTM, considerando los umbrales de escala para la interpretación de los resultados.

7.1.1.2. Variables geomorfométricas

Se derivaron 38 variables geomorfométricas a partir del DEM y de la información climatológica disponible. Doce variables del tipo básico (Cuadro 6-2), 15 variables hidrológicas (Cuadro 6-3) y 11 variables topo-climatológicas (Cuadro 6-4). Estas variables fueron seleccionadas por su relación conceptual con el modelo pedológico de formación del suelo (Figura 2-2), particularmente con los factores *Clima*, *Suelos*, *Organismos* y *Relieve*.

La interacción de estas variables sobre el *Material Parental* de cada ambiente geomorfológico del área de estudio, a lo largo del tiempo, conjuntamente con otras variables no derivadas directamente del DEM, ha dado lugar a los tipos de suelo existentes en el área, con sus características y cualidades propias. Se puede esperar que la relación de las variables consideradas, con los procesos de formación del suelo, permita predecir la *Capacidad de Uso de la Tierra*, tomando en cuenta que ésta es producto de la conjugación de propiedades de los suelos en un ambiente climático y socio-económico particular.

Después de realizar el análisis estadístico de significancia (análisis bivalente), se seleccionaron definitivamente, para el ajuste del modelo, las variables indicadas en el Cuadro 6-5, las cuales corresponden a las de mayor significancia estadística ($p \approx 0$) y que presentan el mayor valor del estadístico χ^2 .

Cuatro variables (*Evapotranspiración Anual*, *Evaporación Anual*, *Temperatura Anual* y *Distancia Horizontal a la Red de Drenaje*) se descartaron a priori por presentar colinealidad

perfecta ($R^2=1$ con alguna otra de las variables). El resto de variables descartadas no eran estadísticamente significativas ($p \approx 1$) y presentaban elevada colinealidad ($R^2 > 0.90$).

Analizando la razón de Odds de cada variable ajustada, presentada en el Apéndice 16, se determinó que las variables más influyentes en el modelo global son, en orden de importancia: *Dimensión Fractal (FRACT)*, *Índice de Protección Morfométrica (MPI)*, *Almacenamiento Anual de Humedad del Suelo (ALM)*, *Elevación (DEM)*, *Excedente Anual de Humedad (EXC)*, *Índice de Potencia de Flujo (SPI)* e *Índice Normalizado de Diferencia de Vegetación (NDVI)*. Las variables *Duración de la Radiación (DURAD)*, *Índice de Convergencia (CONV)* y *Balance Neto (BALN)*, tienen muy poca influencia, con valores de Odd de 1 o cercanos a 1, para casi todas las categorías. El resto de variables tiene una influencia de intermedia a baja.

Las variables **FRACT**, **MPI** y **DEM** están relacionadas directamente con la magnitud y orientación de la pendiente y la elevación del terreno, por lo que son determinantes en la definición de unidades del paisaje sobre las que se desarrollan grupos de suelos con características vinculadas a la topografía, como la pendiente y el micro-relieve, la profundidad del suelo y del manto freático, la erosión y el drenaje externo. Así mismo, la posición altimétrica relativa entre unidades determina los procesos de pérdidas y ganancias de suelo, que también influyen en la génesis del suelo. Por su parte las variables **EXC** y **ALM** contribuyen a la distinción de las propiedades de los suelos relacionadas con la presencia de agua en el perfil, con las reacciones químicas del suelo y con el desarrollo de la actividad de los organismos. Esta relación estrecha con la pedogénesis determina la elevada significancia observada en estas variables para la predicción de las clases de *Capacidad de Uso de la Tierra*.

Dada la alta elevación de la posición del Sol durante todo el año en las latitudes del área de estudio, la variable **DURAD** es importante sólo en las zonas de alta pendiente de la Cordillera de la Costa, por lo que es una variable de poca influencia. La variable **CONV** muestra variabilidad importante sólo en los sectores de inflexión de las pendientes en la zona de montaña, siendo muy uniforme en el resto del área, lo que explica la baja influencia de la variable en el modelo.

La comparación entre variables se basó principalmente en la cantidad de valores de la razón de Odds que se alejan de la unidad para cada categoría de suelo modelada, así, las variables con mayor cantidad de valores que se alejan de la unidad serán las más influyentes

del modelo global. Esto dado que las propias magnitudes de los valores de Odds no pueden ser comparados entre si ya que provienen de variables medidas en diferentes unidades.

Todas las categorías de clasificación son influenciadas por un mínimo de 16 variables, pero no se detecta ningún patrón particular entre las variables y las categorías de suelo. Las clases de *Capacidad de Uso* están definidas por un cambio gradual continuo de los umbrales de las propiedades del suelo (tal como se puede deducir del Cuadro 2-1), por lo que no hay un atributo particular que defina sólo a una clase, como pudiera ocurrir con una categoría ecológica o con una clase taxonómica del suelo.

Es importante destacar que las variables independientes del modelo son relativas a la escala (resolución del DEM) y a los algoritmos de cálculo utilizados, por lo que son válidos solo en esta área y para la escala de trabajo utilizada, no pudiendo extrapolarse para otras regiones.

7.1.1.3. Ajuste y validación del modelo a escala regional

Las variables definitivas seleccionadas corresponden a la combinación de atributos del terreno estadísticamente significativos que producen los valores más altos del índice de McFadden (pseudo R^2) y de la proporción de celdas clasificadas correctamente, así como los valores más bajos de $-2LnL_0$ (pseudo sumatoria de errores cuadrados). El ajuste definitivo tuvo un pseudo R^2 de 0.4766 (Cuadro 6-6), lo que significa que el modelo explica casi el 50% de la variación total de las variables independientes.

El tamaño del área de estudio (7 213 km²) y su ubicación geográfica determina que no exista homogeneidad litológica ni climática, además de la variabilidad de los otros factores formadores del suelo, por lo que el ajuste del modelo y su capacidad predictiva son moderados. Los estudios revisados en el Capítulo 3, casi en su totalidad, se localizan en áreas pequeñas a escala local, centrándose en toposecuencias (principal variabilidad en el factor relieve). En ellos se han obtenido valores de ajuste de elevados a moderados, lo que se explica por el mínimo efecto de los otros factores formadores.

El índice global de concordancia (Cuadro 6-7) fue de 76% y la concordancia relativa a la localización de las celdas fue de 61%, valores que se pueden considerar de moderados a moderadamente altos, apropiados a nivel de planificación regional, para el desarrollo de políticas agrícolas y en la estimación de la recaudación tributaria.

La Tabla de Contingencia (Apéndice 17) ofrece una visión importante sobre el error de clasificación. En la categoría 70 (clase VII), el 83% de las celdas son clasificadas correctamente. En la clase II, 63% de las celdas son correctas y el 25% son clasificadas como clase III. Estas dos clases (II y III) son muy parecidas en cuanto a las propiedades del suelo y su adaptación a grupos de cultivos. Igual ocurre con casi todo el resto de categorías clasificadas. En la clase III, 47% son correctas y 18% son clase II. En la clase IV, 73% son correctas y 14% son clase V. En la clase V, 67% son correctas y 20% son clase III. Las clases VI, VII, VIII y asociaciones de estas, son clasificadas en diferentes proporciones de celdas correctas y de celdas de la clase VII, las cuales en general tiene atributos de suelo muy similares.

7.1.1.4. Ajuste y validación del modelo a escala local

Para la evaluación a escala local se extrajeron ventanas sobre el área de estudio, seleccionando tres de las Áreas de Referencia utilizadas para el ajuste del modelo regional. Cada ventana se ubica en una en las diferentes áreas eco-geográficas en las que se ha dividido el estado. Las ventanas incluyen las 19 variables geomorfométricas, la variable dependiente y una máscara para la delimitación del sector.

- Área de referencia Cuenca del Río El Limón

En este sector, localizado en el relieve de montaña de la Serranía del Litoral, se obtuvo una mejora significativa en el ajuste del modelo y en su capacidad predictora, con un pseudo R^2 de 0.76, un índice Kappa de concordancia global (k_{no}) de 0.9338 y un índice Kappa de concordancia de localización ($k_{location}$) de 0.8809 (Cuadros 6-8 y 6-9). Esta mejora se produce porque en este sector la variabilidad principal responde al factor *Relieve* (la pedogénesis corresponde a una toposecuencia), mientras que los factores *Clima*, *Organismos* y *Material Parental* tienen un mayor grado de homogeneidad. En el modelo regional se incluyeron variables relacionadas con los factores formadores *Clima* y *Organismos* pero al parecer no son suficientemente representativas de la variabilidad regional, además de que no se considera al *Material Parental*.

En este sector también se evaluó el ajuste del modelo con una fuente de información topográfica de mayor nivel de detalle. Se utilizó el DEM generado a partir de las cartas topográficas a escala 1:25.000 y se derivaron las mismas 19 variables geomorfométricas del modelo local anterior y del modelo regional. Los parámetros del ajuste fueron casi iguales

que con el DEM SRTM, obteniendo también un pseudo R^2 de 0.76, un k_{no} de 0.9346, así como un $k_{location}$ de 0.8782 (Cuadros 6-10 y 6-11).

Según este resultado, el mayor nivel de detalle del DEM no produce un mejor ajuste del modelo ni mejora su capacidad predictiva. El mapa de referencia empleado como variable dependiente en los ajustes con ambos DEM fue el mismo (escala 1:100.000), lo que explica que a pesar de incrementar la resolución del DEM, con lo que se deben discernir mejor los parámetros de la topografía, no se produzcan mejoras en el ajuste. Estas últimas se pudieran esperar si también se incrementara el detalle del mapa de referencia, pero para el sector esta información no existe.

- Área de referencia Sector Tocarón

En este sector, ubicado en la planicie lacustrina del Lago de Valencia, la topografía tiene muy baja pendiente y el micro-relieve es plano, por lo que el factor *Relieve* no destaca en la pedogénesis del suelo, como lo hacía en el sector montañoso anterior. El factor *Material Parental* es mucho más importante, siendo la naturaleza de los estratos sedimentarios, originados por depósitos lacustrinos (factor Suelo), determinantes en la definición de la *Capacidad de Uso de la Tierra*. En este sector se obtuvo un pseudo R^2 de 0.32, un k_{no} de 0.64 y un $k_{location}$ de 0.58 (Cuadros 6-12 y 6-13). Evidentemente el ajuste no mejora en este sector, en relación con el ajuste regional, como sí ocurrió en el sector de relieve accidentado, dada la baja importancia del factor *Relieve*, comparado con el factor *Material Parental*. El ajuste del modelo en este sector produjo una razón de Odds de 1 o cercana a 1 para las variables relacionadas con la pendiente (**PEND**, **PENDA**, **CONV**, **ACU**), lo que describe su baja influencia.

En este sector el mapa de suelos de referencia utilizado proviene de la actualización de CEAEA (2005) a escala 1:25.000. El uso de una escala más detallada en la variable dependiente *Capacidad de Uso* no mejora el ajuste del modelo, tal como sí ocurrió con el incremento en el detalle de las variables independientes en el sector anteriormente descrito. Se pudiera lograr un mejor ajuste si se aumentara el detalle tanto de la variable dependiente como de las independientes, sin embargo, en esta zona no se dispone de un DEM de mayor resolución. Esta afirmación amerita mayor evaluación dado que, según los resultados obtenidos, se observa una menor capacidad predictiva de las variables geomorfológicas en esta zona de topografía plana.

- Área de referencia Sector La Peñita

Este sector se ubica en los Llanos Centrales disectados, con un micro-relieve general ondulado, por lo que el factor *Relieve* adquiere mayor importancia que en el sector Tocarón, descrito anteriormente.

En esta zona se obtuvo un pseudo R^2 de 0.54, un k_{no} de 0.72 y un $k_{location}$ de 0.70 (Cuadros 6-14 y 6-15). Estos valores evidencian un mejor ajuste del modelo en la escala local que en la escala regional y una mejor capacidad predictiva del modelo, tal como se observa en la Figura 6-13. Este sector está limitado al este por el río Memo, que recorre en sentido norte-sur todo su perímetro, por lo que la Clase III que se observa en el mapa de la Figura 6-13 corresponde a las vegas del río. Hay una alta concordancia entre las formas de las unidades del mapa real y las de la predicción. La forma del mapa de predicción está más vinculada a la pendiente del terreno y así las vegas del río se adentran en las planicies de las quebradas tributarias ubicadas al margen izquierdo del río Memo.

7.1.2. Modelo de geoprocesamiento para la predicción de la Vocación de Uso de la Tierra

En el marco de la LTDA se han desarrollado metodologías para la evaluación de la *Capacidad* y la *Vocación de Uso de la Tierra* (Jaimes et al., 2002; Peña et al., 2006; Vilorio y Núñez, 2008; Salas, 2008). Las metodologías que valoran la *Vocación de Uso* proponen índices ponderados basados en la asignación de pesos según criterios definidos en juicios de expertos. De esta manera se reemplaza en cierta forma la falta de información sobre algunos parámetros de la definición de *Vocación de Uso* y se califican parámetros de naturaleza cualitativa.

La metodología propuesta en esta investigación trata de superar algunos de los elementos de juicio subjetivo indicados, mediante análisis cuantitativos sobre DEM derivados de parámetros cartográficos relacionados con la *Vocación de Uso*.

7.1.2.1. Disponibilidad de Recursos Hídricos

El *Índice Hídrico*, generado como un estimador de la disponibilidad de recursos hídricos a nivel regional, permitió producir un mapa que se ajusta a la distribución de los recursos hídricos del estado (Figura 6-17). Los valores más altos del índice corresponden a las zonas que efectivamente reciben mayores aportes hídricos, bien sean superficiales, subterráneos o meteorológicos. Al norte del mapa se identifica la zona de bosque húmedo (selva nublada)

del Parque Nacional Henri Pittier, donde se producen los mayores registros de precipitación del Estado a lo largo del año. Lo mismo ocurre en la zona montañosa de Tiara-San Casimiro en el centro-orienté del Estado. Las zonas cubiertas por grandes cuerpos de agua, como lagos y embalses, también producen los valores más elevados del índice. Las adyacencias del Lago de Valencia, del embalse Taiguaiguay y del embalse Suata, en la depresión del Lago, y del embalse Camatagua, al sur, son las zonas de mayor disponibilidad hídrica del Estado, donde se desarrolla la mayor actividad agrícola bajo riego y donde se producen los mayores rendimientos agrícolas.

Los valles de los ríos son también destacados con valores altos y moderadamente altos del *Índice Hídrico*. Se destacan los valles marinos de la vertiente norte de la Serranía del Litoral, conformados por los ríos San Miguel, Ocumare, Cata, quebrada Guarapito, Aroa, Grande, Chuao y quebrada Cepe. En la vertiente sur, el índice destaca los valles de los ríos más importantes y sus tributarios, entre otros el Limón, Güey, Maracay, Caño Colorado, Pedregal, Guayabita, Paya, Aragua y Tuy. Al centro del Estado, en la vertiente sur de la Serranía del Interior se observan los valles de los ríos Tucutunemo, Pao, Caramacate, quebrada Hermana y Zuata, todos afluentes del río Guárico, el cual es regulado por el embalse Camatagua. Las aguas de este embalse son utilizadas principalmente para abastecimiento urbano, con la extracción de más de 70% de su caudal (entre 9 y 12 m³/s) para el abastecimiento de la ciudad de Caracas, aspecto que no es considerado en el *Índice Hídrico*. Al sur del Estado, aguas abajo del embalse Camatagua, se destacan los valles de la quebrada Camatagüita y los ríos Cura, Tinapuey, Taguay, Guárico, caño Tacatinemo, caño Los Manires, caño Camoruco, quebrada Juajua, quebrada Caicara y río Memo.

En las zonas de menor *Índice Hídrico* confluye un bajo valor de *Acumulación de Flujo (ACU)*, con elevadas *Pendientes (PEND)*, lo que determina un bajo *Índice Topográfico de Humedad (TWI)* y consecuentemente una baja tendencia a generar escorrentía. En esta zona también se presenta un bajo valor del *Excedente Hídrico Anual (EXC)*, como producto de las bajas precipitaciones comparadas con las zonas de *Índice Hídrico* elevado.

Desde el punto de vista cuantitativo se encontró que los componentes del *Índice Hídrico* presentan una elevada correlación ($R^2=88.50\%$) con el Esgurrimiento Medio Anual (*EMA*) en las cuencas hidrográficas de las principales obras de embalse de la región, lo que demuestra la validez de las predicciones del índice.

El índice puede mejorar su capacidad predictiva si se incorporan variables relativas al recurso hídrico subterráneo. La variable *Densidad de Cuerpos de Agua (DCA)* toma en cuenta sólo el componente superficial del escurrimiento, mientras que las variables *TWI*, *ACU* y *EXC* están relacionados con la disponibilidad potencial de los dos tipos de recurso pero sin posibilidades de discernir entre ellos. Se podría integrar al índice un modelo de elevación (profundidad) de los acuíferos locales, si se dispusiera de registros piezométricos adecuados a la escala de evaluación, lo que aportaría una cuantificación del recurso. Así mismo, se debe mejorar el balance hídrico regional, considerando una *Capacidad de Almacenamiento de Humedad en el Suelo (ALM)* real, basada en mediciones de campo y tomando en cuenta su variabilidad espacial. Este balance además debe incorporar las extracciones para usos consuntivos no agrícolas y los aportes por trasvases de otras regiones. Para estas consideraciones se debe plantear el tratamiento de la información en unidades de análisis basadas en cuencas hidrográficas que posteriormente se pueden integrar en unidades regionales administrativas.

7.1.2.2. Disponibilidad de Infraestructura

El *Índice de Infraestructura* fue obtenido a partir de la determinación de la densidad de la red vial primaria (troncales), secundaria (locales) y terciaria (ramales y sub-ramales) obtenida de la cartografía básica 1:100.000. El mapa generado (Figura 6-18) presenta una correspondencia con la distribución de la red de infraestructura de servicio del Estado (vialidad, electricidad, acueductos, poliductos), toda vez que las redes de servicio generalmente se localizan a lo largo de los corredores de servicio establecidos con la red vial. Además, en la red de vialidad digitalizada se incluyó la red de caminos y picas utilizadas para el mantenimiento de estas obras y que puede ser utilizada como vías de penetración agrícola (la disponible en la escala de la cartografía).

Los mayores valores del índice se presentan en el sector densamente urbanizado de la depresión del Lago de Valencia, en el que convergen las vías más importantes del Estado, como la Autopista Regional del Centro (T001) y las carreteras Maracay-Villa de Cura (T002), Maracay-Choroní (L006), Maracay-Ocumare (L007), Maracay-Mariara (L001), Maracay-Los Teques (L001), Maracay-Magdaleno (L003), Magdaleno-Güigüe (T011). Los ejes carreteros orientales, La Victoria-Colonia Tovar (L004), La Victoria-Pao de Zarate (L004) y Pao de Zarate-Tiara (L002), tienen una densidad vial moderada, al igual que el eje Camatagua-Paso de Cura (T011) y Paso de Cura-Barbacoas (L008), en el sur de Aragua.

Las zonas con menor índice corresponden al extremo norte del Estado, de fuerte orografía, en la Serranía de la Costa y en el centro-oriente y centro-occidente de la Serranía del Interior, así como en el extremo sur-este del Estado.

Este índice se podría mejorar incorporando otras capas de información en el cálculo de la *Densidad Vial*, tales como la red hidráulica de distribución de los sistemas de riego existentes (entidades lineales).

7.1.2.3. Disponibilidad de Insumos y Servicios

Se generó un *Índice de Servicios* a través de la *Densidad de Centros Poblados* del territorio estatal (Figura 6-20). En el mapa se observa que el mayor valor del índice se presenta en la depresión del lago de Valencia y valles del río Aragua, donde se ubican las mayores ciudades del Estado (Maracay, Cagua, Turmero, San Mateo, La Victoria, Tejerías y Villa de Cura). También se observa un índice elevado en el área de influencia de la ciudad de San Juan de Los Morros, capital del vecino Estado Guárico. En estos centros poblados se localiza la mayor concentración de población del estado, 1 712 582 hab (92%), así como los principales mercados mayoristas, beneficiadoras, plantas agroindustriales, silos y comercios del centro del país, los cuales proveen los insumos y servicios requeridos en la actividad agrícola. Otros núcleos poblados, con un valor moderado del índice, se observan en las poblaciones de San Sebastián y Camatagua, en el sur del Estado.

Las zonas de fuerte relieve, en las Serranías de la Costa y del Interior, y el despoblado sur del Estado, presentan un valor del índice de muy bajo a nulo.

Igual que los índices anteriores, la capacidad predictiva se pudiera incrementar incorporando otras capas de información, como la red de centros de acopio, silos, centros de suministro de insumos y servicios agrícolas, mercados, plantas de procesamiento agroindustrial, frigoríficos y otros (entidades puntuales).

7.1.2.4. Índice integrado de Agrosoporte

Los tres índices descritos se integraron en el *Índice de Agrosoporte*, mostrado en la Figura 6-21. Allí se observan las zonas de mayor índice en los alrededores de los cuerpos de agua (Lago de Valencia, embalse Taiguaiguay, embalse Suata, embalse Camatagua), así como en los valles de los principales ríos.

También se destacan con elevado índice, la zona de piedemonte y las laderas bajas que bordean las áreas descritas. Los valores obtenidos del índice en estos sectores se deben a la

cercanía a zonas de alta disponibilidad hídrica y de infraestructura, a pesar de presentar relieve accidentado de altas pendientes. La vocación en esta zona debe disminuir, como corresponde, cuando se incorpora al *Índice de Agrosoporte*, la *Capacidad de Uso de la Tierra* y los *Requerimientos Agroecológicos de los Cultivos*.

El *Índice de Agrosoporte* tiene una escala de 0 a 1. El valor a asignar a los otros componentes de la vocación dependen del uso de la tierra y cada uno de ellos debe escalarse a valores Booleanos.

7.1.3. Modelo de geoprocesamiento para la Tributación Territorial

En todas las fincas seleccionadas para la aplicación del geoproceso de valoración tributaria, los rubros que no se adaptan a la *Capacidad de Uso* tampoco se adaptan a la *Vocación de Uso* (fincas de código 3, 52, 225 y 196 en el Cuadro 6-17). Este resultado es lógico ya que de lo contrario el mecanismo tributario promovería la degradación del recurso suelo, al designar con *Vocación de Uso* a rubros que no tienen *Capacidad de Uso* como consecuencia de las características edafo-climáticas del sitio.

Tanto la *Capacidad de Uso* como los *Requerimientos Agroecológicos de los Cultivos* son componentes de la *Vocación de Uso* derivados de evaluaciones de las condiciones físico-naturales de un área y de su adaptabilidad a determinados rubros, por lo tanto se podría esperar que un rubro no adaptado a la *Capacidad de Uso* tampoco cumpla con los *Requerimientos Agroecológicos de los Cultivos*. Sin embargo, la *Capacidad de Uso* está referida a grupos generales de utilización de la tierra (cereales, hortalizas, oleaginosas), mientras que los *Requerimientos Agroecológicos* se refieren a rubros específicos en condiciones locales (maíz, tomate, girasol), por lo que pueden diferir en su apreciación de la adaptabilidad de un determinado rubro, en una determinada zona.

Los *Planes Agrícolas*, por su parte, plantean preferencias y prioridades de cultivos con base en determinadas políticas de desarrollo, aunque también deben estar sustentados en las condiciones agroecológicas locales o regionales y la LTDA establece que estos planes deben adaptarse a las clases de *Vocación*.

En este orden de ideas, los componentes *Vocación de Uso*, *Requerimientos Agroecológicos* y *Planes Agrícolas*, deben seguir en general una misma tendencia en la asignación y calificación de usos de la tierra.

La evaluación de escenarios de tributación arroja los resultados presentados en la Figura 6-26. En esta figura se observa el impacto del impuesto sobre los ingresos reales de fincas con distintos niveles de productividad, tanto en fincas adaptadas a la *Vocación de Uso de la Tierra*, como en fincas no adaptadas. En la Figura 6-26 se muestra el descenso exponencial de la relación Impuestos/Ingresos reales con el incremento de la productividad de la tierra, hasta llegar a niveles de máxima productividad que no están sujetas a retribución. Este ejemplo grafica como se espera reducir, con medidas fiscales, la ociosidad de las tierras agrícolas.

Se debe destacar que la información básica edafológica para la predicción de la Capacidad y Vocación de Uso de la Tierra se basa en escalas 1:100.000 y la resolución de 90 m del DEM lo hace apropiado para escalas entre 1:100.000 y 1:250.000, por lo que la aplicación del procedimiento de predicción se debe orientar a fincas mayores a 160 ha. La determinación de la *Vocación de Uso* para la *Tributación Territorial* en fincas menores a esa superficie, con la información derivada en esta investigación, sólo debe tener un fin orientativo y amerita una evaluación en campo o el desarrollo de modelos a partir de información a escala 1:25.000.

De acuerdo a los procedimientos establecidos en la LTDA, las fincas que no se adaptan a la *Vocación de Uso*, así como las que tienen una producción real (PR) menor al 80% de la producción idónea (PI), disponen de un término perentorio de dos años para sobrepasar esta situación. Finalizado este plazo, si los propietarios u ocupantes no han superado totalmente estos niveles de productividad, comenzará a causarse el impuesto (con su mayor tarifa) y las tierras pasan a ser consideradas ociosas, por lo que estarán sujetas a los mecanismos contemplados en la LTDA para la afectación y redistribución de tierras (ANRBV, 2005).

El modelo integral de valoración tributaría, incluyendo la valoración productiva, debe ser implementado en una Infraestructura de Datos Espaciales, tal como la propuesta por Abarca y Bernabé (2010b, 2008b, 2008c), para permitir su aplicación por parte de las instituciones y funcionarios responsables, así como por los productores agrícolas sujetos a tributación.

7.2. CONCLUSIONES

La investigación desarrollada permitió formular una metodología de geoprocesamiento para la valoración productiva y tributaria de las tierras agrícolas en el ámbito geográfico regional del Estado Aragua-Venezuela.

El desarrollo de la metodología permitió identificar el método de *Capacidad de Uso de la Tierra* como el adecuado para la valoración productiva con fines de *Tributación Territorial*, bajo las condiciones actuales de disponibilidad de información del país. Así mismo, condujo a la identificación y caracterización de un conjunto global de variables geomorfométricas, vinculadas con el proceso pedogenético del suelo, las cuales pueden ser evaluadas y aplicadas para ajustar modelos estadísticos que puedan predecir la *Capacidad de Uso de la Tierra*.

Se diseñó un modelo de geoprocusamiento para la valoración de la *Capacidad de Uso de la Tierra* en el Estado Aragua, a partir de 19 variables geomorfométricas derivadas del DEM y de estudios de suelos existentes en sectores específicos utilizados como referencia, mediante el ajuste de un modelo de regresión logística multinomial. El modelo ajustado no es extrapolable a otras regiones, dado que se probó su validez sólo para las características específicas del área de estudio, pero se puede emplear la metodología para determinar el conjunto adecuado de variables geomorfométricas con el que se obtenga el mejor ajuste y validez del modelo en otras regiones de diferentes condiciones agroecológicas. La metodología formulada también puede ser de utilidad para el pre-mapeo de unidades cartográficas en las cuales realizar el muestreo de estudios de suelo con menos subjetividad que en los procedimientos basados en juicios de expertos.

Este modelo de geoprocusamiento se puede desarrollar a escalas más detalladas, utilizando un DEM de mayor resolución para generar las variables geomorfométricas y ajustando el modelo con mapas de referencia a una escala de detalle equivalente a la del DEM.

Se diseñó un modelo de geoprocusamiento para la valoración de la *Vocación de Uso de la Tierra* en el Estado Aragua, a partir de seis índices equivalentes a los componentes físico-naturales, socio-económicos y políticos de la *Vocación de Uso*. El componente físico-natural, conformado por la *Capacidad de Uso* y los *Requerimiento Agroecológicos de los Cultivos*, se deriva de estudios locales y específicos en cada región, al igual que el componente político, correspondiente a los *Planes Agrícolas*. Otro componente físico-natural, la *Disponibilidad de Recursos Hídricos*, así como los componentes socio-económicos *Disponibilidad de Infraestructura, Servicios e Insumos*, son estimados a partir de un índice integrado (*Índice de Agrosoprote*) que arrojó resultados acordes con la realidad espacial socio-económica simulada.

Se diseñó un modelo de geoprocesamiento para la *Tributación Territorial* a partir de la valoración productiva de las tierras agrícolas, derivada de los geoprocesos de *Capacidad y Vocación de Uso*. El modelo para el cálculo de la tributación es aplicable a cualquier región administrativa del país en las que se tenga disponible información sobre la distribución parcelaria y el uso actual de la tierra en las parcelas.

El modelo diseñado evalúa las diferencias socio-económicas en la región pero no permite comparaciones entre regiones, dado que la escala de valoración es relativa para la región de valoración.

La simulación de escenarios de tributación permite comprobar la intencionalidad del impuesto predial de gravar las fincas menos productivas, con la finalidad de enfrentar la ociosidad de las tierras. Igualmente se comprobó el correcto funcionamiento de las diferentes alternativas para la determinación de la base imponible del impuesto, formuladas en el mecanismo tributario de la LTDA.

Además de la valoración tributaria, los modelos de geoprocesamiento para la evaluación productiva de las tierras agrícolas, en particular el *Índice de Agrosoprote*, tienen aplicación en el ámbito de la planificación regional y en la definición de políticas agrícolas, dada la posibilidad de cuantificar las diferencias territoriales en la distribución de la disponibilidad de recursos hídricos, de infraestructura y de servicios agrícolas, así como en la determinación del potencial y las limitaciones agroproductivas de las tierras.

En relación a las hipótesis planteadas para el desarrollo de la investigación se llega a las siguientes conclusiones:

- Se puede utilizar la cartografía predictiva de suelos para generar variables interpretativas de suelo, como la *Capacidad de Uso de la Tierra*. La bondad de ajuste de los modelos y su capacidad predictiva está en función del grado de precisión de la información de entrada y del grado de homogeneidad existente en los factores formadores del suelo no considerados. Si un factor es muy heterogéneo en un área determinada, se deben incluir variables vinculadas a ese factor, para que el modelo pueda ajustarse a esa variabilidad.
- Se pueden hacer predicciones regionales pero los ajustes del modelo son menos precisos que en las predicciones locales, dada la heterogeneidad espacial de los factores formadores de suelo a escala regional.

- El modelo de regresión utilizado mejora su capacidad predictiva con la incorporación de las variables del clima (*Excedente Anual de Humedad del Suelo*, *Almacenamiento Anual de Humedad del Suelo* y *Duración de la Radiación Solar*) y vegetación (*NDVI*). Los estadísticos de evaluación, sin embargo tienen un ajuste moderado, por lo que se deben evaluar otras variables de estos factores, así como variables correspondientes a otros factores formadores no incluidos pero que tienen gran variabilidad a escala regional, como el material parental.
- Los aspectos socio-económicos, que define la *Vocación de Uso* de las tierras agrícolas, pueden ser simulados a partir de elementos cartográficos como la red vial y la red de centros poblados. La capacidad de predicción se pudiera incrementar incorporando otras capas con información socio-económica de naturaleza espacial, como la red riego, drenaje o la red de puntos de suministro de insumos y productos agrícolas y la red de puntos de consumo o mercadeo.
- La disponibilidad de recursos hídricos, como componente físico-natural de la *Vocación de Uso*, puede ser estimada a través de variables cartográficas disponibles, como la red hidrográfica, de componentes del balance hídrico regional y de elementos derivados del DEM, como el *Índice Topográfico de Humedad* y la *Acumulación de Flujo*. La capacidad de predicción se pudiera incrementar incorporando capas de información vinculadas a la disponibilidad del recurso hídrico subterráneo y mejorando la estimación del balance hídrico.
- El procedimiento de valoración tributaria establecido en la legislación venezolana, se puede aplicar en áreas con escasa disponibilidad de información. Para ello se debe aplicar los modelos de geoprocésamiento desarrollados para la valoración productiva de las tierras agrícolas.

7.3. APORTACIONES ORIGINALES

Entre las aportaciones que se pueden considerar originales en esta tesis se citan:

- Se utiliza un modelo de regresión logística multinomial para la predicción de la *Capacidad de Uso de la Tierra*. Los estudios evaluados que utilizan regresión logística generalmente se orientan a la estimación de propiedades o características básicas del suelo (como el contenido de materia orgánica), o a la evaluación de cualidades del suelo que se derivan de una combinación de propiedades (como la fertilidad). Pero no se ha

encontrado algún estudio relacionado con la estimación de la capacidad productiva de las tierras mediante modelos de regresión logística.

- Se genera información sobre la *Capacidad de Uso de la Tierra* en áreas con información edafológica limitada, a partir de atributos del terreno fácilmente obtenibles de un DEM satelital como el SRTM.
- Se realiza un estudio de predicción, a través de un modelo estadístico en un ámbito geográfico regional. La generalidad de los estudios evaluados es realizada a escala local, en zonas pequeñas, con alto nivel de detalle, para controlar las variables que no son incluidas en el modelo. En este estudio se trabaja a escala regional, para validar su aplicación en el ámbito de una región administrativa de gestión tributaria. Las variables que tienen heterogeneidad regional como el clima y la vegetación son incluidas en el análisis para tratar de lograr un ajuste válido.
- Se desarrollan índices que dan una estimación de la distribución regional cuantitativa de variables de naturaleza socio-económica, en áreas de limitada disponibilidad de información. La construcción de estos índices parte de variables fácilmente obtenibles, como la red de infraestructura registrada en la cartografía básica, o de atributos del terreno derivados de un DEM satelital.
- Se propone una metodología de geoprocusamiento como alternativa a métodos de gran subjetividad, basados en el juicio de expertos que se utiliza para la definición de la escala de la *Vocación de Uso de la Tierra*.
- Se está proponiendo una metodología, basada exclusivamente en el geoprocusamiento, para la valoración tributaria del impuesto territorial venezolano. Las técnicas fiscales generalmente se basan en criterios económicos, en formulaciones empíricas o en registros históricos del mercado de transacciones, para definir la valoración de la base imponible sujeta a tributación. La metodología que se propone permite la valoración masiva de las tierras y la aplicación a gran escala de la tributación.
- Se presenta una revisión detallada de los principales algoritmos geomorfométricos, con su fundamentación matemática, y su vinculación con los procesos formadores del suelo.
- Se desarrollaron modelos de regresión múltiple para la estimación de la evaporación mensual en todo el territorio del Estado Aragua.

- Se generó una base de datos cartográfica básica, ambiental y geomorfométrica, que consta de unas 500 capas de información con escalas de origen entre 1:25.000 y 1:100.000, para la totalidad del territorio del Estado Aragua y para los sectores de referencia. Esta información puede ser incorporada a los servicios de visualización de la Infraestructura de Datos Espacial de Venezuela.

7.4. NUEVAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

La presente investigación deja abierta las siguientes líneas de investigación:

- Estandarización y desarrollo informático de los modelos de geoprocesamiento formulados, para su implementación a través de una Infraestructura de Datos Espaciales (IDE) mediante el desarrollo de servicios WPS (Web Processing Service). Este desarrollo permitiría la aplicación de la metodología por parte de las administraciones así como de los sujetos tributarios afectados, los cuales también deberían tener acceso al procedimiento a través de la IDE.
- Evaluación de otras técnicas de modelado estadístico, como las redes neuronales artificiales o los árboles de decisión, para la predicción de la *Capacidad de Uso de la Tierra*.
- Evaluación de la aplicación de la metodología para la predicción de la *Capacidad de Uso* en áreas de mayor homogeneidad, como las zonas eco-geográficas del Estado Aragua, descritas en el texto. Otra opción a evaluar implica la división de la región administrativa en cuencas hidrográficas, con lo que se pueden implementar e interpretar mejor las variables geomorfométricas hidrológicas y climatológicas.
- Evaluación de la metodología de predicción de la *Capacidad de Uso* en áreas con una mayor densidad de muestreo de suelos y con una extensión superficial suficiente para mantener la heterogeneidad de los factores formadores encontrada en la región evaluada. Se supone que los mapas de las Áreas de Referencia utilizados recogen la variabilidad espacial que se está modelando. Esta premisa se puede evaluar densificando el muestreo o utilizando un mapa de suelos con una escala más detallada.
- Aplicación del modelo de geoprocesamiento de la *Vocación de Uso* a diferentes regiones del país, de condiciones socio-económicas variables, para definir una escala de valoración de alcance nacional. Esto dado que la escala de valoración adoptada del

Índice de Vocación o sus componentes (*Índice de Infraestructura*, *Índice de Servicios* e *Índice Hídrico*) es relativa al área de estudio.

- Evaluación de la incorporación de otras capas de información a los componentes socio-económicos del *Índice de Vocación*. Estas capas, como las redes puntuales de suministro, procesamiento y consumo de productos agrícolas, se pueden obtener de la cartografía básica, pero requieren actualización mediante trabajo de campo.
- Evaluación de la capacidad de predicción del *Índice Hídrico*, para lo cual se puede emplear la información hidrológica disponible o modelos hidrológicos de simulación. La capacidad predictiva de este índice puede mejorar si se incorpora información sobre el potencial de los acuíferos y se determina con precisión la *Capacidad Nominal de Almacenamiento de Humedad del Suelo*. También se puede evaluar el efecto de otras variables geomorfológicas relacionadas con la hidrología, como las *Distancias a la Red de Drenaje*, el *Índice de Potencia de Flujo* y otras. Igualmente se debe considerar la integración de combinaciones o cocientes de bandas Landsat, empleadas comúnmente para el estudio del agua o la interacción agua-suelo. Para la evaluación de este índice también tiene sentido la aplicación en cuencas hidrográficas, en vez de regiones administrativas.
- Evaluación de los algoritmos geomorfológicos. En casi todas las variables geomorfológicas revisadas se encontraron procedimientos de cálculo alternativos desarrollados por diferentes autores. Así mismo, muchos de los procedimientos de cálculo presentan parámetros en los que se deben asignar valores en función de las características particulares del área de estudio. Los procedimientos geomorfológicos fueron diseñados para modelar una determinada característica o propiedad ambiental relacionada con el relieve, pero pudieran ser empleadas para evaluar otros elementos ambientales. Los algoritmos también pueden ser modificados para ajustarse a una determinada finalidad de valoración, sobre todo en áreas con disponibilidad limitada de datos básicos. Estos aspectos determinan un extenso campo de investigación que se prolonga más allá de la valoración productiva de las tierras agrícolas.

BIBLIOGRAFÍA

Abarca, O. (1998). *Metodología para la aplicación de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) en la planificación del desarrollo físico agrícola. Estudio de caso: Plan de desarrollo físico-agrícola del área de influencia de la laguna La Caicara, Municipio Autónomo Urdaneta, sur del Estado Aragua-Venezuela*. Maracay-Venezuela: Facultad de Agronomía – UCV. 96 pp.

Abarca, O. y Bernabé, M. (2008a). Desarrollo metodológico para la simulación hidrológica de caudales de estiaje con el SIG SEXTANTE. *Mapping Interactivo*, Nov/Dic (130) [en línea]. [Citado el 10/03/2009]. Disponible en: <http://www.mappinginteractivo.com/plantilla-ante.asp?id_articulo=1534>.

Abarca, O.; Bernabé, M. (2008b). Propuesta de un modelo conceptual para el desarrollo de una IDE orientada a la gestión de Estaciones Experimentales de investigación, extensión, docencia y producción. *Geofocus*, 8, pp. 1-22 [en línea]. [Citado el 10/03/2009]. Disponible en: <<http://geofocus.rediris.es/principal.html>>.

Abarca, O.; Bernabé, M. (2008c). Viabilidad de la implantación de una Infraestructura de Datos Espaciales (IDE) para la gestión pública y participativa de las tierras en Venezuela. *Geofocus*, 8, pp. 61-93 [en línea]. [Citado el 10/03/2009]. Disponible en: <<http://geofocus.rediris.es/principal.html>>.

Abarca, O. y Bernabé, M. (2010a). Proyección de la demanda de tierras agrícolas en Venezuela, a partir del análisis de las necesidades alimentarias de la población del país al año 2020. *Agronomía Trop.*, 60 (1). En Prensa.

Abarca, O. y Bernabé, M. (2010b). Evaluación de la red institucional de información geográfica para la gestión de tierras en Venezuela. Una propuesta de Infraestructura de Datos Espaciales (IDE). *Scripta Nova*. En Prensa.

Abarca, O. y Ormeño, S. (2009). Evaluación de un método de corrección de los efectos topográficos sobre imágenes Landsat ETM+ en zonas montañosas tropicales. *Mapping*, 137, pp. 30-40.

Abarca, O. y Rodríguez, S. (2005). Caracterización ambiental e hidráulico estructural de la red de acueductos locales de la población de El Limón, municipio Mario B. Iraragorry, estado Aragua. *Agronomía Trop.*, 55 (2), pp. 233-263.

Ablan, M.; Andressen, R.; Vargas, M. y Acevedo, M. (2008). Propuesta metodológica para el control de calidad de datos de precipitación. *Agronomía Trop.*, 58 (1), pp. 57-60.

Abreu, X. (2000). *Caracterización pedogeomorfológica y de los tipos de utilización de la tierra relevantes en la Cuenca Alta del Río Guárico, Sector Sur de Aragua*. Maracay-Venezuela: Fundacite Aragua. 114 pp.

ACFMN (1993). *COPLANARH. Plan Nacional de Aprovechamiento de los Recursos Hidráulicos: 25 años después*. Academia de Ciencias Físicas, Matemáticas y Naturales. Caracas: Biblioteca de la Academia. 130 pp.

ANC (2000). Constitución Nacional de la República Bolivariana de Venezuela. Asamblea Nacional Constituyente. *Gaceta Oficial* (N° 5453 Extraordinario, 24 de marzo de 2000). Caracas: Imprenta Nacional.

ANRBV (2005). Ley de Reforma Parcial del Decreto N° 1546 con Fuerza de Ley de Tierras y Desarrollo Agrario. Asamblea Nacional de la República Bolivariana de Venezuela. *Gaceta Oficial* (N° 5771 Extraordinario, 18 de mayo de 2005). Caracas: Imprenta Nacional.

Antonić, O. (1998). Modelling daily topographic solar radiation without site-specific hourly radiation data. *Ecological Modelling*, 113 (1-3), pp. 31-40.

Antonić, O.; Marki, A. y Križan, J. (2000). A global model for monthly hourly direct solar radiation. *Ecological Modelling*, 129 (2-3), pp. 113-118.

Assunção, J. y Moreira, H. (2005). Land taxes in Latin American context. Texto para Discussão N° 497. Pontificia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Río de Janeiro: Departamento de Economia. 23 pp.

Bathgate, J.; y Duran, L. (2003). A geographical information systems based landscape classification model to enhance soil survey: A southern Illinois case study. *Journal of Soil and Water Conservation*, 58 (3), pp. 119-127.

Benacchio, S. (1982). *Algunas exigencias agroecológicas en 58 especies de cultivos con potencial de producción en el trópico americano*. Maracay-Venezuela: CENIAP. 202 pp.

Benacchio, S.; Escalante, E. y Avilán W. (1982). Estimación de épocas de siembra para varios cultivos en el sur del Estado Aragua. *Agronomía Trop.*, 33 (1-6), pp. 7-21.

Berberoglu, S.; Evrendilek, F.; Ozkan, C. y Donmez, C. (2007). Modeling forest productivity using Envisat MERIS data. *Sensors*, 7, pp. 2115-2127.

Beven, K.; Kirkby, M. (1979). A physically based variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrological Sciences Bulletin*, 24 (1), pp. 43-69.

Biasino, J. (1983). *Sur de Aragua. Mapa de suelos (1:100.000)*. Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables-MARNR. Programa Inventario Nacional de Tierras. Caracas: DGIIA.

Biasino, J.; López, G.; Peñalosa, A. y Berroterán, J. (1990). *Inventario Nacional de Tierras. Guárico Central y Sur de Aragua*. Tomo II. Municipio Urdaneta y Camatagua. 535 pp.

Bishop, T.; Minasny, B. y McBratney, A. (2006). Uncertainty analysis for soil-terrain models. *International Journal of Geographical Information Science*, 20 (2), pp. 117-134.

Boettinger, J.; Ramsey, R.; Bodily, J.; Cole, N.; Kienast-Brown, N.; Nield, S.; Saunders, A. y Stum, A. (2008). Landsat spectral data for digital soil mapping. En: A. Hartemink, A. McBratney y M. Mendoça-Santos (Eds.). *Digital Soil Mapping with Limited Data* (pp. 193-202). Wageningen-Sydney-Río de Janeiro: Springer.

- Böhner, J.; AntoniĆ, O. (2009). Land-Surface parameters specific to topo-climatology. En: T. Hengl y H. Reuter (Eds.), *Geomorphometry. Concepts, Software, Applications* (pp. 195-213). Amsterdam-Oxford: Elsevier.
- Böhner, J. y Selige, T. (2006). Spatial prediction of soil attributes using terrain analysis and climate regionalization. En: J. Böhner, K. McCloy y J. Strobl (Eds.), *SAGA – Analysis and Modelling Applications* (pp. 13-27). Göttinger Geographische Abhandlungen, Vol. 115, 130 pp.
- Brenning, A. y Trombotto, D. (2006). Logistic regression modeling of rock and glacier distribution: Topographic and climatic controls in the semi-arid Andes. *Geomorphology*, 81, pp. 141-154.
- Burrough, P. y McDonnell, R. (2005). *Principles of Geographical Information Systems. Spatial Information Systems and Geostatistics*. Oxford: Oxford University Press. 333 pp.
- Campling, P.; Gobin, A.; Feyen, J. (2002). Logistic Modeling to Spatially Predict the Probability of Soil Drainage Classes. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 66, pp. 1390-401.
- Carvalho, W.; Fernandes, E.; Vieira, C.; Schaefer, C. ; Chagas, C. (2008). Geomorphometric attributes applied to soil-landscapes supervised classification of mountainous tropical areas in Brazil : a case study. En: A. Hartemink, A. McBratney y M. Mendonça-Santos (Eds.), *Digital Soil Mapping with Limited Data* (pp. 357-365). Wageningen-Sydney-Río de Janeiro: Springer.
- Castillejo, I.; Fernández, P; García-Ferrer, A. y Sánchez, M. (2006). Estudio comparativo de los distintos métodos de cálculo de pendientes derivados de modelos digitales del terreno. *XVIII Congreso Internacional de Ingeniería Gráfica*. Barcelona 31/05 al 02/06 de 2006.
- Castillo, M. del. (1992). Morfometría de lagos. Una aplicación a los lagos del Pirineo. Barcelona: Departamento de Ecología-Universidad de Barcelona. 286 pp.
- Cavada, J. (2007). *Impuesto territorial a empresas forestales en Chile y legislación comparada*. Santiago de Chile: Biblioteca del Congreso Nacional. 23 pp.
- Chuviebo, E. (2002). *Teledetección ambiental. La observación de la Tierra desde el Espacio*. Barcelona: Ariel Ciencia. 586 pp.
- Cimmery, V. (2007). *User Guide for SAGA (version 2.0)* [en línea]. [Citado el 11/02/2009]. Disponible en: <<http://www.saga-gis.org/en/index.html>>.
- Clark, W. y Hosking, P. (1986). *Statistical Methods for geographers*. New York: John Wiley & Sons. 518 pp.
- Comerma, J. y Arias, L. (1971). *Un sistema para evaluar las capacidades de uso agropecuario de los terrenos en Venezuela*. Maracay: Sociedad Venezolana de la Ciencia del Suelo. 57 p.

- Cortes, A. y Malagón, D. (1983). Los levantamientos de suelos y sus aplicaciones multidisciplinarias. Serie: suelos y clima. Mérida, Venezuela: CIDIAT. 409 pp.
- Cortez, A.; Núñez, M. y Rodríguez, M. (2007). Adaptabilidad agroecológica del cultivo del aguacate en el Estado Aragua, Venezuela. *Bioagro*, 19 (2), pp. 85-90.
- Costa-Cabral, M. y Burges, S. (1994). Digital Elevation Model Networks (DEMON), a model of flow over hillslopes for computation of contributing and dispersal areas. *Water Resources Research*, 30 (6), pp. 1681-1692.
- CEAEA (2005). Programa de Cooperación para la recolección de la información que requiere la implementación del Decreto N° 578 de la Gobernación del Estado Aragua para el registro de tierras establecido en la Ley de Tierras y su reglamento. Comisión Especial Agraria del Estado Aragua. Informe final. Maracay-Venezuela: UCV-Facultad de Agronomía.
- Debella-Gilo, M.; Etzelmuller, B.; Klakegg, O. (2007). Digital soil mapping using Digital Terrain analysis and statistical modelling integrated into GIS: Examples from Vestfold County of Norway. *ScanGIS'2007 - Proceedings of the 11th Scandinavian Research Conference on Geographical Information Sciences* (pp. 237-253). Ås-Noruega: University of Life Sciences.
- Delahaye, O. (2006). Tenencia de la tierra y desarrollo rural sostenible: algunos puntos para la reflexión en el caso venezolano. *Agroalimentaria*, 23, pp. 11-20.
- Desmet, P. y Govers, G. (1996). Algorithms to route flow over digital landscapes: a comparison and their implications for predicting ephemeral gullies. *Geomorphologie*, 2(3), pp. 41-50.
- Dobos, E. y Hengl, T. (2009). Soil mapping applications. En: T. Hengl y H. Reuter (Eds.), *Geomorphometry. Concepts, Software, Applications* (pp. 461-479). Amsterdam-Oxford: Elsevier.
- Dokuchaev, V. (1898). On soils zones in general, and on the vertical zones specifically. En: *Selected Papers 1949*, vol. 3 (pp. 322-329). Selhozgiz-Moscow.
- Doraiswamy, P.; Sinclair, T.; Hollinger, S.; Akhmedov, B.; Stern, A.; Prueger, J. (2005). Application of MODIS derived parameters for regional crop yield assessment. *Remote Sensing of Environment*, 97, pp. 192-202.
- Drăgut, L. y Blaschke, T. (2006). Automated classification of landform elements using object-based image analysis. *Geomorphology*, 81, pp. 330-344.
- Drake, J. y Weishampel, J. (2000). Multifractal analysis of canopy height measures in a longleaf pine savanna. *Forest Ecology and Management*, 128, pp. 121-127.
- Eastman, R. (2006). *Idrisi Andes. Guide to GIS and Image Processing*. Worcester, Ma: Clark University. 327 pp.

Elizalde, G.; Vilorio, J.; Jácome, A. (2000). *Elementos de Agrología. Fundamentos teóricos para la Etapa I del Curso de Edafología Aplicada II*. Guía de Clases. Departamento de Edafología. Maracay-Venezuela: UCV-Facultad de Agronomía. 150 pp.

Emeis, S. y Knoche, H. (2009). Applications in Meteorology. En: T. Hengl y H. Reuter (Eds.), *Geomorphometry. Concepts, Software, Applications* (pp. 603-622). Amsterdam-Oxford: Elsevier.

ERSDAC (2009). Aster Global Digital Elevation Model (ASTER GDEM) [en línea]. Earth Remote Sensing Data Analysis Center. [Citado el 28/10/2009]. Disponible en: <<http://www.ersdac.or.jp/GDEM/E/index.html>>.

Evans, I.; Hengl, T. y Gorsevski, P. (2009). Applications in Geomorphology. En: T. Hengl y H. Reuter (Eds.), *Geomorphometry. Concepts, Software, Applications* (pp. 497-525). Amsterdam-Oxford: Elsevier.

Fairfield, J. y Leymarie, P. (1991). Drainage networks from grid digital elevation models. *Water Resources Research*, 27 (5), pp. 709-717.

FAO (1976). *Esquema para la evaluación de tierras*. Roma: Boletín de Suelos N° 32.

FAO (1983). *Directivas: Evaluación de Tierras para la Agricultura en Secano*. Roma: Boletín de Suelos N° 52.

FAO (1985). *Directivas: Evaluación de Tierras para la Agricultura de Regadío*. Roma: Boletín de Suelos N° 55.

FAO (1990). *Directivas: Evaluación de Tierras para Usos Forestales*. Roma: Boletín de Montes N° 48.

FAO (1991). *Guidelines: land evaluation for extensive grazing*. Roma: Soils Bulletin N° 58.

FAO (2006). *Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. Estudios FAO Riego y Drenaje N° 56. 298 pp.

Freeman, T. (1991). Calculating catchment area with divergent flow based on a regular grid. *Computer and Geosciences*, 17 (3), pp. 413-422.

Gallant, J. y Dowling, T. (2003). A multiresolution index of valley bottom flatness for mapping depositional areas. *Water Resources Research*, 39 (12), pp. 1347-1360.

Giasson, E.; Figueiredo, S.; Tornquist, C. y Clarke, R. (2008). Digital soil mapping using logistic regression on terrain parameters for several ecological regions in Southern Brazil. En: A. Hartemink, A. McBratney y M. Mendoça-Santos (Eds.), *Digital Soil Mapping with Limited Data* (pp. 225-232). Wageningen-Sydney-Río de Janeiro: Springer.

Gloaguen, R.; Marpu, P. y Niemeyer, I. (2007). Automatic extraction of faults and fractal analysis from remote sensing data. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 14, pp. 131-138.

Gruber, S. y Peckham, S. (2009). Land-Surface Parameters and Objects in Hydrology. En: T. Hengl y H. Reuter (Eds.), *Geomorphometry. Concepts, Software, Applications* (pp. 171-194). Amsterdam-Oxford: Elsevier.

Gurdak, J. (2006). Using logistic regression to assess regional ground-water vulnerability: High Plains Aquifer. 5th National Water-Quality Monitoring Council Meeting, May-7-11, San Jose, CA.

Gutierrez, C. (2008). *Latin American tax handbook*. Amsterdam: IBDF. 304 p.

GVA (2009). Conselleria de Infraestructures i Transport. GvSIG [en línea]. [Citado el 10/10/2009]. Disponible en: <<http://www.gvsig.gva.es/inicio-gvsig/>>.

Hartemink, A. (2008). Soil Map density and a Nation's Wealth and Income. En: A. Hartemink, A. McBratney y M. Mendonça-Santos (Eds.), *Digital Soil Mapping with Limited Data* (pp. 53-66). Wageningen-Sydney-Río de Janeiro: Springer.

Hengl, T. y Evans, I. (2009). Mathematical and Digital Models of the Land Surface. En: T. Hengl y H. Reuter (Eds.), *Geomorphometry. Concepts, Software, Applications* (pp. 31-63). Amsterdam-Oxford: Elsevier.

Hengl, T. y MacMillan, R. (2009). Geomorphometry – A key to Landscape Mapping and Modelling. En: T. Hengl y H. Reuter (Eds.), *Geomorphometry. Concepts, Software, Applications* (pp. 433-460). Amsterdam-Oxford: Elsevier.

Hengl, T. y Rossiter, D. (2003). Supervised landform classification to enhance and replace photo-interpretation in semi-detailed soil survey. *Soil Science Society of America Journal*, 67 (6), pp. 1810-1822.

Hofierka, J.; Mitášová, H. y Neteler, M. (2009). Geomorphometry in GRASS GIS. En: T. Hengl y H. Reuter (Eds.), *Geomorphometry. Concepts, Software, Applications* (pp. 387-410). Amsterdam-Oxford: Elsevier.

Holdridge, L. (1967). *Life Zone Ecology*. Tropical Science Center. San José, Costa Rica. (Tr. Humberto Jiménez Saa: Ecología Basada en Zonas de Vida, 1a. Ed. San José, Costa Rica: IICA, 1982.

Horn, B. (1981). Hill shading and the reflectance map. *Proceedings IEEE*, 69 (1), pp. 14-47.

Iregui, A.; Melo, L.; Ramos, J. (2003). *El impuesto predial en Colombia: evolución reciente, comportamiento de las tarifas y potencial de recaudo*. Bogotá: Banco de la República. 82 pp.

Jácome, A.; Aguerrevere, G. y López, M. (2001a). Sistema de Información Ambiental Cuenca Alta del Río Guárico. Informe final. Maracay-Venezuela: Fundacite Aragua. 110 pp.

- Jácome, A.; Vilorio, J. y Elizalde G. (2001b). Separabilidad de unidades pedogeomorfológicas en un sector del sur del Estado Aragua, por medio de análisis digital de imágenes de satélite y un modelo digital de terreno. *Agronomía Trop.*, 51(1), pp. 49-63.
- Jaimes, E. (1985). Análisis de las relaciones Geomorfología-Suelo en las Cuencas altas de los Ríos Aragua y Petaquire, Serranía del Litoral Central, Cordillera de la Costa. Maracay: UCV-Facultad de Agronomía. 300 pp.
- Jaimes, E.; Mendoza, J.; Ramos, Y. y Pineda, N. (2002). Propiedad de la tierra y la seguridad agroalimentaria de Venezuela. *Interciencia*, 27 (12), pp. 656-663.
- Jaramillo, D. (2001). Introducción a la Ciencia del suelo. Universidad Nacional de Colombia. Medellín: Escuela de Geociencias. 593 pp.
- Jarvis, A.; Rubiano, J.; Nelson, A.; Farrow, A. y Mulligan, M. (2004). *Practical use of SRTM data in the tropics - Comparisons with digital elevation models generated from cartographic data*. Cali-Colombia: Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT) [en línea]. [Citado el 11/05/2009]. Disponible en: <<http://srtm.csi.cgiar.org/PDF/Jarvis4.pdf>>.
- Jelaska, S. (2009). Vegetation Mapping Applications. En: T. Hengl y H. Reuter (Eds.), *Geomorphometry. Concepts, Software, Applications* (pp. 481-496). Amsterdam-Oxford: Elsevier.
- Jenness, J. (2007). Some thoughts on analyzing topographic habitat characteristics [en línea]. [Citado el 15/11/2009]. Disponible en: <http://www.jennessent.com/downloads/topographic_analysis_online.pdf>.
- Jenny, H. (1941). *Factors of Soils Formation*. New York: McGraw-Hill. 288 p.
- Jenson, S. y Domingue, O. (1988). Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 54 (11), pp. 1953-1960.
- Jones, K. (1998). A comparison of algorithms used to compute hill slope as a property of the DEM. *Computer & Geosciences*, 24 (4), pp. 315-323.
- Kiss, R. (2004). Determination of drainage network in digital elevation models. Utilities and limitations. *Hungarian Geological Society*, 2, pp. 16-29.
- Klingebiel, A. y Montgomery, P. (1961). *Land capability classification*. Washington: Soil Conservation Service, USDA. 21 pp.
- Köthe, R.; Gehrt, E. y Böhner, J. (1996). Automatische Reliefanalyse für geowissenschaftliche. Anwendungen - derzeitiger Stand und Weiterentwicklung des Programms SARA. *Arbeitshefte Geologie*, 1, pp. 31-37.

Lagacherie, P. (2008). Digital Soil Mapping: A state of the Art. En: A. Hartemink, A. McBratney y M. Mendonça-Santos (Eds.), *Digital Soil Mapping with Limited Data* (pp. 3-14). Wageningen-Sydney-Río de Janeiro: Springer.

Lagacherie, P. y Voltz, M. (2000). Predicting soil properties over a region using sample information from a mapped reference area and digital elevation data: a conditional probability approach. *Geoderma*, 97 (3-4), pp. 187-208.

Lam, N. (1990). Description and measurement of Landsat-TM images using fractals. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 56, pp. 187-195.

Lee, J.-S. (1980). Digital image and noise filtering by use of local statistics. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. PAMI, N° 2, pp. 165-168.

Machado, D.; Puche, M.; Vilorio, J.; Parra, M. y Primera, M. (2007). Geoespacialización de información climática mediante la utilización de sistemas de Información Geográfica. Caso Cuenca Alta del río Guárico. *II Jornadas Nacionales de Geomática*, 03 al 05 de Octubre de 2007. Caracas. 16 pp.

MacMillan, R.; Torregrosa, A.; Moon, D.; Coupé, R. y Philips, N. (2009). Automated Predictive Mapping of Ecological Entities. En: T. Hengl y H. Reuter (Eds.), *Geomorphometry. Concepts, Software, Applications* (pp. 551-578). Amsterdam-Oxford: Elsevier.

MAC (1998). *Resultados del VI Censo Agrícola 1997*. Ministerio de Agricultura y Cría. Caracas: Dirección de Estadística e Informática.

MAC-ONCTA (1998). Ortofotomapas Proyecto PITSA. Formatos impreso (1:25.000) y digital del Estado Aragua. Ministerio de Agricultura y Cría. Caracas: IGVSb.

MARNR-SAGECAN (1995). Ortofotomapas Proyecto CARTOCENTRO. Formatos impreso (1:25.000) y digital del Estado Aragua. Ministerio del Ambiente y los Recursos Naturales Renovables. Caracas: IGVSb.

MAT (2007). *Plan Integral de Desarrollo Agrícola (PIDA) 2007-2008*. Caracas: Ministerio de Agricultura y Tierras. 335 pp.

McBratney, A.; Mendonça, S. y Minasny, B. (2003). On digital soil mapping. *Geoderma*, 117, pp. 3-52.

McKenzie, N. y Ryan, P. (1999). Spatial prediction of soil properties using environmental correlation. *Geoderma*, 89, pp. 67-94.

Menard, S. (2002). *Applied Logistic Regression Analysis. Series: Quantitative Applications in the Social Sciences*, N° 7-106. Thousand Oaks, California-London-New Delhi: Sage Publications. 111 pp.

Mendonça-Santos, H.; Dart, R. y Pares, J. (2008). Digital Mapping of Soil Classes in Rio de Janeiro State, Brazil: Data, Modelling and Prediction. En: A. Hartemink, A. McBratney y M.

Mendoça-Santos (Eds.), *Digital Soil Mapping with Limited Data* (pp. 381-396). Wageningen-Sydney-Río de Janeiro: Springer.

METI-NASA (2009). ASTER Global Digital Elevation Model (ASTER GDEM) [en línea]. [Citado el 28/10/2009]. Disponible en: <<https://wist.echo.nasa.gov/~wist/api/imswelcome/>>.

MINAMB (2008). Datos meteorológicos mensuales. Ministerio del Ambiente. Caracas: Dirección de Hidrología, Meteorología y Oceanología.

Minasny, B.; McBratney, A. y Murray, L. (2008). Digital Soil Mapping Technologies for Countries with Sparse Data Infrastructures. En: A. Hartemink, A. McBratney y M. Mendoça-Santos (Eds.), *Digital Soil Mapping with Limited Data* (pp. 15-30). Wageningen-Sydney-Río de Janeiro: Springer.

Mitasova, H. y Mitas, L. (2001). Multiscale soil erosion simulations for land use management. En: R. Harmon y W. Doe (Eds.), *Landscape Erosion and Evolution Modeling* (pp. 321-347). New York: Kluwer Academic/Plenum Publishers.

Moore, I. y Wilson, J. (1992). Length-slope factors for the Revised Universal Soil Loss Equation: Simplified method of estimation. *Journal of Soil and Water Conservation*, 47, 423-428.

Moore, I.; Gessler, P.; Nielsen, G. y Peterson, G. (1993). Soil Attribute Prediction Using Terrain Analysis. *Soil Science Society of America Journal*, 57 (2), pp. 443-452.

MOP-MAC-MARNR (1970-1998). Cartas topográficas del Estado Aragua (1:100.000 y 1:25.000). Ministerio de Obras Públicas-Ministerio de Agricultura y Cría-Ministerio del Ambiente y los Recursos Naturales Renovables. Caracas: IGVS.

Moriondo, M.; Maselli, F. y Bindi, M. (2007). A simple model of regional wheat yield based on NDVI data. *European Journal of Agronomy*, 26 (3), pp. 266-274.

NASA (2009). Shuttle Radar Topography Mission [en línea]. [Citado el 20/01/2009]. Disponible en: <<http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>>.

Nelson, A.; Reuter, H. y Gessler, P. (2009). DEM Production Methods and Sources. En: T. Hengl y H. Reuter (Eds.), *Geomorphometry. Concepts, Software, Applications* (pp. 65-85). Amsterdam-Oxford: Elsevier.

O'Callaghan, J. y Mark, D. (1984). The Extraction of Drainage networks from Digital Elevation Data. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 28, pp. 323-344.

Ohlmacher, G. y Davis, J. (2003). Using multiple logistic regression and GIS technology to predict landslide hazard in northeast Kansas, USA. *Engineering Geology*, 69, pp. 332-343.

Olaya, V. (2006). Fundamentos de Análisis Geográfico con SEXTANTE [en línea]. [Citado el 0/05/2007]. Disponible en: <<http://campusvirtual.unex.es/calacala/course/view.php?id=146>>.

Olaya, V. (2009). Basic Land-Surface Parameters. En: T. Hengl y H. Reuter (Eds.), *Geomorphometry. Concepts, Software, Applications* (pp. 141-169). Amsterdam-Oxford: Elsevier.

Olaya, V. y Conrad, O. (2009). Geomorphometry in SAGA. En: T. Hengl y H. Reuter (Eds.), *Geomorphometry. Concepts, Software, Applications* (pp. 293-308). Amsterdam-Oxford: Elsevier.

Olsson, L. y Pilesjö, P. (2002). Approaches to spatially distributed hydrological modelling in a GIS environment. En: A. Skidmore (Ed.), *Environmental Modelling with GIS and Remote Sensing* (pp. 166-199). London-New York: Taylor and Francis.

Ormeño, S. (2006). Teledetección Fundamental. 3Ed. Universidad Politécnica de Madrid-Departamento de Ingeniería Topográfica y Cartografía. 344 pp.

Oueslati, I.; Allamano, P.; Claps, P. y Bonifacio, E. (2009). Soil organic matter prediction using environmental factors. Geophysical Research Abstracts, 11. EGU General Assembly 2009.

Ovalles, F. y Zinck, A. (1987). Estudio de suelos semidetallado Depresión del Lago de Valencia. Bloques de levantamiento N° 24 y 25 (Taiguaiguay, Villa de Cura, Macapo y Caño Rico). Clasificación taxonómica de suelos. Informe final. Serie de Informes Técnicos. Maracay: MARNR. Zona 2. 435 pp.

Parra, J. (2006). La Teoría General del Tributo Agrario y el Impuesto Venezolano a las Tierras Ociosas. III Jornadas de Tributación Agrícola, 30 oct. al 01 sep. (paper).

Peckham, S. (2009). Geomorphometry and Spatial Hydrologic Modelling. En: T. Hengl y H. Reuter (Eds.), *Geomorphometry. Concepts, Software, Applications* (pp. 579-602). Amsterdam-Oxford: Elsevier.

Penizek V. y Boruvka, L. (2008). The Digital Terrain Model as a tool for improved delineation of alluvial soils. En: A. Hartemink, A. McBratney y M. Mendoça-Santos (Eds.), *Digital Soil Mapping with Limited Data* (pp. 319-326). Wageningen-Sydney-Río de Janeiro: Springer.

Peña, C.; Pacheco, C.; Romero, E.; Suniaga, J.; Vásquez, J.; Dávila, M. y Rojas, J. (2006). Clasificación de suelos con fines agrícolas. Una propuesta metodológica para la aplicación del Reglamento Parcial de la Ley de Tierras y Desarrollo Rural. *Agricultura Andina*, 11 (Extraordinario-Ene/Dic), 9-27.

Pérez, M.; Puche, M. y Bracho, G. (2007). Herramientas para el control de calidad de datos climáticos y su análisis con fines de uso agropecuario. *CENIAP Hoy*. Preimpresos [en línea]. [Citado el 10/05/2009]. Disponible en: <<http://www.ceniap.gov.ve/pbd/RevistasTecnicas/ceniaphoy/preimpresos/preimpresos.htm>>.

Peucker, T. y Douglas, D. (1975). Detection of surface-specific points by local parallel processing of discrete terrain elevation data. *Computer Graphics and Image Processing*, 4, pp. 375-387.

Pike, R. Evans, I. y Hengl, T. (2009). Geomorphometry: A Brief Guide. En: T. Hengl y H. Reuter (Eds.), *Geomorphometry. Concepts, Software, Applications* (pp. 3-30). Amsterdam-Oxford: Elsevier.

Pineda, C.; Machado, D. y Casanova, E. (2006). Evaluación física de tierras de la cuenca alta del Río Guárico con fines de producción sustentable de agua. *Agronomía Trop.*, 56 (3), pp. 385-414.

Pontius, G. (2000). Quantification Error Versus Location Error in Comparison of Categorical Maps. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 66 (8), pp. 1011-1016.

Pontius, G. (2002). Statistical Methods to Partition Effects of Quantity and Location During Comparison of Categorical Maps at Multiple Resolutions. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 68 (10), pp. 1041-1049.

Pontius, G. y Suedmeyer, B. (2004). Components of Agreement between Categorical Maps at Multiple Resolutions. En: R. Lunetta y J. Lyon (Eds.), *Remote Sensing and GIS Accuracy Assessment* (pp. 233-250). Florida: CRC Press.

Quinn, P.; Beven, K.; Chevallier, P. y Planchon, O. (1991). The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modelling using digital terrain models. *Hydrological Processes*, 5, pp. 59-79.

Racoviteanu, A. (2004). *Sacred mountains and glacial archeology in The Andes*. Faculty of the Graduate School of the University of Colorado. Boulder-Co: Departmente of Geography. 155 pp.

RBV (2005). Reglamento Parcial del Decreto con Fuerza de Ley de Tierras y Desarrollo Agrario para la Determinación de la Vocación de Uso de la Tierra Rural. *Gaceta Oficial* (N° 38 126, 14 de febrero de 2005). República Bolivariana de Venezuela. Decreto N° 3.463. Caracas: Imprenta Nacional.

Rey, J. (2007). *Levantamiento de suelos*. Guía de Clases. Departamento de Edafología. Maracay-Venezuela: UCV-Facultad de Agronomía. 10 pp.

Rossiter, D. (1998). *Notas del curso: Evaluación de Tierras*. Cochabamba-Bolivia: Proyecto CLAS/ITC. 33 pp.

Rossiter, D. (2005). *Digital Soil Mapping: towards a multiple-use Soil Information System*. Semana de la geomática. Bogotá: IGAC. 13 pp.

Salas, M.; Delgado, F.; Esteva, Y. y Sampson, M. (2008). La ordenación del territorio y la vocación de uso agrícola de la tierra en Venezuela. *Revista Geográfica Venezolana*, 49 (2), pp. 267-288.

- Sánchez, P.; Couto, W. y Buol, W. (1982). The fertility capability soil classification system: Interpretation, applicability and modification. *Geoderma*, 27 (4), pp. 283-309.
- Schmidt, J.; Evans, I. y Brinkmann, J. (2003). Comparison of polynomial models for land surface curvature calculation. *International Journal of Geographical Information Science*, 17, pp. 797-814.
- Schneider, K. y Robbins, P. (Eds.) (2001). *GIS and Mountain Environments*. UNITAR/GRID Volume 5. Worcester, Ma: Clark Labs, Clark University. 125 pp.
- Scull, P.; Franklin, J.; Chadwick, O. y McArthur, D. (2003). Predictive soil mapping: a review. *Progress in Physical Geography*, 27 (2), pp. 171-197.
- Sharpnack, D. y Atkins, G. (1969). An algorithm for computing slope and aspect from elevations. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 35, pp. 247-248.
- Shary, P. (1995). Land surface in gravity points classification by a complete system of curvatures. *Mathematical Geology*, 27 (3), pp. 373-390.
- Shary, P.; Sharay, L. y Mitusov, L. (2002). Fundamental quantitative methods of land surface analysis. *Geoderma*, 107 (1-2), pp. 1-32.
- SIACARG (2005). Sistema de Información Ambiental de la Cuenca Alta del Río Guárico. MARN-UCV [Programa informático]. [Consultado el 19/01/2005]. Maracay-Venezuela: UCV-Facultad de Agronomía-Instituto de Edafología.
- SIACRA (2005). Sistema de Información Ambiental de la Cuenca del Río Aragua. MARN-UCV [Programa informático]. [Consultado el 19/01/2005]. Maracay-Venezuela: UCV-Facultad de Agronomía-Instituto de Edafología.
- Siderius, W. (Ed.) (1986). Land evaluation for land-use planning and conservation in sloping areas. International Institute for Land Reclamation and Improvement, Wageningen, publication 40. 334 pp.
- Singh, D.; Herlin, I.; Berroir, J.; Silva, E. y Simoes M. (2004). An approach to correlate NDVI with soil colour for erosion process using NOAA/AVHRR data. *Advances in Space Research*, 33, pp. 328-332.
- SISDELAV (2005). Sistema de Información de Suelos de la Depresión del Lago de Valencia. MARN-UCV-Fundación Polar. [Programa informático]. [Consultado el 19/01/2005]. Maracay-Venezuela: UCV-Facultad de Agronomía-Instituto de Edafología.
- Sjoquist, D. (2004). *The land value tax in Jamaica: An analysis and options for reform*. Atlanta: Georgia State University - Andrew Young School of Policy Studies. 110 pp.
- Smit, H.; Metzger, M.; Ewert, F. (2008). Spatial distribution of grassland productivity and land use in Europe. *Agricultural Systems*, 98, pp. 208-219.

Strebin, S. (1989). Atlas de capacidad de uso de las tierras de los Estados centrales y centro occidentales. Caracas: MARNR-DGIIA-DSVF. 112 pp.

Strebin, S. y Pérez J. (1974). Capacidad de uso de las tierras del Estado Aragua. Caracas: Ministerio de Obras Públicas. Dirección General de Recursos Hidráulicos. 44 pp.

Sucre, D. (2003). Delimitación de Áreas Eco-geográficas del Estado Aragua. Maracay-Venezuela: Papeles de Fundacite Aragua. 76 pp.

Suet, C. y Lam, Y. (2004). Comparison of flow routing algorithms used in Geographic Information Systems. University of Southern California, Faculty of the Graduate School. 97 pp.

Tarboton, D. (1997). A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models. *Water Resources Research*, 33 (2), pp. 309-319.

Thommeret, N.; Bailly, J. y Puech, C. (2009). Robust Extraction of Thalwegs Networks from DTMs for Topological Characterization: A case Study on Badlands. *Proceedings of Geomorphometry*, Zurich: 31 aug – 2 sep, pp. 218-223.

Travis, M.; Elsner, G.; Iverson, W. y Johnson, C. (1975). VIEWIT: Computation of Seen Areas, Slope, and Aspect for Land-use Planning. F.S. Gen. Tech. Rep. PSW-11/1975. Berkeley, Ca.: USDA, 70 pp.

UCLA (2009). Introduction to SAS. Academic Technology Services, Statistical Consulting Group [en línea]. [Citado el 08/09/2009]. Disponible en: <http://www.ats.ucla.edu/stat/mult_pkg/faq/general/Psuedo_RSquareds.htm>.

University of Maryland (2008). Earth Science Data Interface (ESDI) at the Global Land Cover Facility [en línea]. [Citado el 23/02/2009]. Disponible en: <<http://glcfapp.umiacs.umd.edu:8080/esdi/index.jsp>>.

USDI (1971). *Manual de clasificación de tierras con fines de riego*. 2da Ed. United States Department of Interior. A. Estrada (Trad.) Caracas: MOP-División de Edafología. 85 pp.

USGS (2009). Shuttle Radar Topography Mission [en línea]. [Citado el 20/01/2009]. Disponible en: <<http://srtm.usgs.gov/>>.

Valladares, G. y Hott, M. (2008). The use of GIS and Digital Elevation Model in Digital Soil Mapping – A case study from Sao Paulo, Brazil. En: A. Hartemink, A. McBratney y M. Mendoça-Santos (Eds.), *Digital Soil Mapping with Limited Data* (pp. 349-356). Wageningen-Sydney-Río de Janeiro: Springer.

Ventura, S. e Irvin, B. (2000). Automate landform classification methods for soil-landscape studies. En: J. Wilson y J. Gallant (Eds.), *Terrain Analysis* (pp. 267-294). New York: Wiley & Sons.

Vera, N. (2005). Atlas climático de irradiación solar a partir de imágenes del satélite NOAA. Aplicación a la Península Ibérica [en línea]. Tesis Doctoral. Barcelona: Universidad

de Cataluña. 283 pp. [Citado el 8/10/2009]. Disponible en:

<http://www.tesisenxarxa.net/TESIS_UPC/AVAILABLE/TDX-1019105-082541/00Nvm00de17.pdf>.

Viloria, J. (2000). *Clasificación de Tierras por Capacidad de Uso*. Guía de Clases. Departamento de Edafología. Maracay-Venezuela: UCV-Facultad de Agronomía. 13 pp.

Viloria, J. (2008). *Inventario expedito de tierras en parcelas rurales con escasa información de suelos*. Guía de Clases. Departamento de Edafología. Maracay-Venezuela: UCV-Facultad de Agronomía. 11 pp.

Viloria, J.; Estrada, C.; Rey, J. (1998). SISDELAV: Sistema de información de suelos de la Depresión del Lago de Valencia. Universidad Central de Venezuela, Facultad de Agronomía. Instituto de Edafología. *Venesuelos*, 6 (1-2).

Viloria, J. y Núñez, Y. (2008). Estudio de características de los suelos, capacidad de uso y vocación de uso de las tierras de la Hacienda Tamarindo, Municipio Zamora, Estado Aragua. Instituto de Edafología. Maracay-Venezuela: UCV-Facultad de Agronomía. 30 pp.

Vinluan, R.; Encarnación, M.; López, E. y Tabios, G. (1997). A fractal approach to the classification of land cover in radar imagery [en línea]. [Citado el 03/06/2009]. Disponible en: <<http://www.gisdevelopment.net/aars/acrs/1997/ts9/ts9003.asp>>.

Vrščaj, B.; Daroussin, J. y Montanarella, L. (2007). SRTM as a possible source of elevation information for soil-landscape modelling. En: R. Peckham y G. Jordan (Eds.), *Digital Terrain Modelling. Development and applications in a policy support environment* (pp. 99-120). Berlin-Heidelberg-New York: Springer-Verlag.

Wischmeier, W. y Smith, D. (1978). Predicting rainfall erosion losses - A guide to conservation planning. Agriculture Handbook N° 537. Washington DC: US Department of Agriculture.

Zevenbergen, L. y Thorne, C. (1987). Quantitative analysis of land surface topography. *Earth Surface Processes and Landforms*, 12, pp. 47-56

APÉNDICES

**APÉNDICE 1. Clases de Capacidad de Uso de la Tierra definidas en el Reglamento
Parcial de la Ley de Tierras y Desarrollo Agrario.**

Clase de Suelo ³	Profundidad efectiva del suelo	Características Principales	
I	> 80 cm	Topografía: Plana de 0 a 3%	
		Erosión: Ligera	
		Suelo	Textura: F-Fa-FAa y FL-FAL-FA-L
			Pedregosidad: Ligera
			Fertilidad: Neutro (pH = 6.6 – 7)
		Drenaje	Interno: Moderado
			Externo: Moderado
			Inundación: No tiene
II	> 80 cm	Topografía: Plana de 0 a 3%	
		Erosión: Ligera	
		Suelo	Textura: F-Fa-FAa y FL-FAL-FA-L
			Pedregosidad: Ligera
			Fertilidad: Ligeramente ácida (pH =6 – 6.5)
		Drenaje	Interno: Moderado
			Externo: Lento y Moderado
			Inundación: No tiene
III	50 – 80 cm	Topografía: Ondulaciones muy espaciadas de 3 a 8 %	
		Erosión: Moderada	
		Suelo	Textura: a-aF / F-Fa-FAa y FL-FAL-FA-L
			Pedregosidad: Moderada
			Fertilidad: Moderada a fuerte acidez (pH= 4.5 – 5.9)
		Drenaje	Interno: Lento, moderado y rápido
			Externo: Lento, moderado y rápido
			Inundación: 1 cada 5 años.
IV	50 – 80 cm	Topografía: Ondulaciones espaciadas y/o pendientes de 8 a 12%	
		Erosión: Moderada	
		Suelo	Textura: a-aF / F-Fa-FAa y FL-FAL-FA-L / AL-Aa-A
			Pedregosidad: Moderada
			Fertilidad: Moderadamente alcalino (pH= 7.5 – 8.3)
		Drenaje	Interno: Lento, moderado y rápido
			Externo: Lento, moderado y rápido
			Inundación: 1 cada 5 años
V	25 – 50 cm	Topografía: Ondulaciones espaciadas y/o pendientes de 8 a 12%	
		Erosión: Moderada	
		Suelo	Textura: a-aF / F-Fa-FAa y FL-FAL-FA-L / AL-Aa-A
			Pedregosidad: Moderada
			Fertilidad: Moderadamente alcalino (pH=7.5 – 8.3)
		Drenaje	Interno: Lento, moderado y rápido
			Externo: Lento, moderado y rápido

³ La Vocación de Uso de la Tierra se deriva de la combinación de los elementos físicos indicados en este cuadro (Capacidad de Uso de la Tierra), con la adaptabilidad agroecológica de los cultivos, con la disponibilidad de recursos hídricos y con elementos de orden socio-económico (disponibilidad de insumos y servicios y disponibilidad de infraestructura) y de orden político (planes agrícolas).

Clase de Suelo ³	Profundidad efectiva del suelo	Características Principales	
			Inundación: 1 cada 5 años
VI	25 – 50 cm	Topografía: Ondulaciones espaciadas y pendientes 12 a 30%	
		Erosión: Fuerte	
		Suelo	Textura: a-aF / F-Fa-FAa y FL-FAL-FA-L / AL-Aa-A
			Pedregosidad: Fuerte
			Fertilidad: Extremadamente ácido (pH= 3.5 – 4.5)
		Drenaje	Interno: Muy lento, lento, moderado y rápido
			Externo: Muy lento, lento, moderado y rápido
			Inundación: Frecuente (de 2 a 3 años)
VII	0 – 25 cm	Topografía: Quebradizo con pendientes mayores de 30 %	
		Erosión: Severa	
		Suelo	Textura: a-aF / F-Fa-FAa y FL-FAL-FA-L / AL-Aa-A
			Pedregosidad: Severa
			Fertilidad: Extremadamente ácido (pH= 3.5 – 4.5)
		Drenaje	Interno: Muy lento, lento, moderado y rápido
			Externo: Muy lento, lento, moderado y rápido
			Inundación: Frecuente (de 2 a 3 años)
VIII	0 – 25 cm	Topografía: Quebradizo con pendientes mayores de 30 %	
		Erosión: Severa	
		Suelo	Textura: a-aF / F-Fa-FAa y FL-FAL-FA-L / AL-Aa-A
			Pedregosidad: Severa
			Fertilidad: Fuerte a extremadamente alcalino (pH=8,4-9) y menores de 3.5.
		Drenaje	Interno: Muy lento, lento, moderado y rápido
			Externo: Muy lento, lento, moderado y rápido
			Inundación: Muy Frecuente (de 2 a 3 años)

Leyenda: Clases texturales: arenoso (a), arenofrancoso (aF), francoarenoso (Fa), francoarcilloarenoso(FAa), franco (F), francoarcilloso (FA), francolimoso (FL), francoarcillolimoso (FAL), limoso (L), arcillolimoso (AL), arcilloarenoso (Aa), arcilloso (A). pH= potencial de Hidrógeno. Profundidad efectiva: Capacidad de penetración de las raíces, sin impedimento de la roca madre, de un horizonte muy endurecido, mesa de agua o nivel freático.

APÉNDICE 2. Calificación de factores específicos de las clases de Capacidad de Uso de las Áreas de Referencia chequeadas en campo e información catastral recolectada.

- Área de referencia Sector La Peñita.

	Sector La Peñita				
Clase	III	IV	V-V	IV-III	IV-VI
Pendiente (%)	< 3	8-20	3-8	< 3	8-20
Microrelieve	Ondulado	Ondulado	Ondulado	Ondulado	Ondulado
Erosión	Ligera	Ligera	Moderada	Ligera	Ligera
Textura	Fina	Muy fina	Media	Muy fina	Muy fina
Pedregosidad	Ligera	Ligera	Ligera	Ligera	Ligera
Profundidad (cm)	50-100	50-100	50-100	50-100	50-100
Salinidad	Ligera	Ligera	Ligera	Ligera	Ligera
Fertilidad	Ligera	Ligera	Severa	Ligera	Ligera
Permeabilidad	No limitante	No limitante	No limitante	No limitante	No limitante
Drenaje Interno	Moderado	Moderado	Moderado	Moderado	Moderado
Drenaje Externo	Moderado	Moderado	Moderado	Moderado	Moderado
Inundación	Sin	Sin	Sin	Ocasional	Sin
Gran Grupo 1	Ustrophepts	Chromusterts	Haplustults	Ustrophepts	Ustrophepts
Gran Grupo 2	Ustrophepts	Tropaqualfs	Paleustults	Tropaquepts	Haplustalfs
Subclase general 1	III S	IV T	V TES	IV SD	IV T
Subclase general 1			V TS	III S	VI TE
Porcentaje 1 (%)			50	60	60
Porcentaje 2 (%)			30	20	30

Fuente: CEAEA (2005).

- Área de referencia Sector Tocarón.

	Sector Tocarón			
Clase	II	III	VI	VII
Pendiente (%)	< 3	< 3	< 3	8-20
Microrelieve	Plano	Plano	Plano	Ondulado
Erosión	No limitante	No limitante	No limitante	No limitante
Textura	Media	Muy fina	Media	Media
Pedregosidad	Ligera	Ligera	Ligera	Ligera
Profundidad (cm)	> 100	> 100	25-50	< 25
Salinidad	Ligera	Ligera	Ligera	Ligera
Fertilidad	Ligera	Ligera	Moderada	Ligera
Permeabilidad	No limitante	Lenta	No limitante	No limitante
Drenaje Interno	Moderado	Lento	Moderado	Rápido
Drenaje Externo	Moderado	Lento	Moderado	Rápido
Inundación	Sin	Sin	Sin	Sin
Subclase general	II C	III S	VI S	VII TS

Fuente: CEAEA (2005).

- Área de Referencia Sector Cuenca Alta del Río El Limón.

Clase	Cuenca Alta del Río El Limón			
	II	III	VI	VII
Pendiente (%)	< 3	< 3	< 3	20-45
Microrelieve	Plano	Plano	Plano	Ondulado
Erosión	No limitante	No limitante	No limitante	No limitante
Textura	Media	Media	Gruesa	No limitante
Pedregosidad	Ligera	Ligera	Ligera	No limitante
Profundidad (cm)	> 100	50-100	25-50	25-50
Salinidad	Ligera	Ligera	Ligera	No limitante
Fertilidad	Ligera	Ligera	Ligera	Fuerte
Permeabilidad	No limitante	No limitante	No limitante	No limitante
Drenaje Interno	Moderado	Moderado	Rápido	No limitante
Drenaje Externo	Moderado	Moderado	Rápido	No limitante
Inundación	Sin	Sin	Muy frecuente	No limitante
Subclase general	II C	III S	VI SD	VII TE

Fuente: CEAEA (2005).

- Elementos recolectados de información catastral en los sectores La Peñita y Tocarón.

Fecha de levantamiento	Ocupante o Propietario
Asentamiento	Nombre
Nombre	CI
Parcela o Finca	Tipo de tenencia
Nombre	Documento de Tenencia
Código Catastral	Servicios de la Parcela o Finca
Relieve general	Vialidad
Ubicación de parcela o finca	Vivienda
Estado	Riego
Municipio	Electricidad
Parroquia	Teléfono
Limites de Parcela o Finca	Sistemas de producción
Este	Vegetal
Oeste	Animal
Norte	Cobertura natural
Sur	Planimetría GPS de Parcela

Fuente: CEAEA (2005).

APÉNDICE 3. Algoritmos geomorfométricos para la determinación de la Pendiente, la Orientación y la Curvatura del terreno.

Dado que la malla raster que representa la superficie topográfica se considera una función matemática continua, se puede derivar en cualquier lugar. La pendiente topográfica y la orientación del terreno son derivadas de primer orden y la curvatura del terreno es una derivada de segundo orden. En este contexto es básico el concepto de vector gradiente. El gradiente del campo escalar (elevaciones del DEM) en un punto, se define como un vector cuya dirección es aquella donde ocurre la máxima variación y cuya magnitud es la pendiente del campo escalar en esa dirección. En dos dimensiones el gradiente tiene la siguiente expresión (Olaya, 2009):

$$\nabla Z = \left(\frac{\partial z}{\partial x}, \frac{\partial z}{\partial y} \right) \quad (1)$$

Donde:

∇Z es el gradiente del campo escalar de elevaciones Z,

$\frac{\partial z}{\partial x}$ es la tasa de cambio del campo escalar Z en la dirección x,

$\frac{\partial z}{\partial y}$ es la tasa de cambio del campo escalar Z en la dirección y.

Considerando una ventana de búsqueda móvil de 3x3 celdas, que representa una pequeña porción del DEM (Figura 1), se pueden ajustar los nueve puntos de la ventana exactamente mediante una función polinómica con nueve coeficientes.

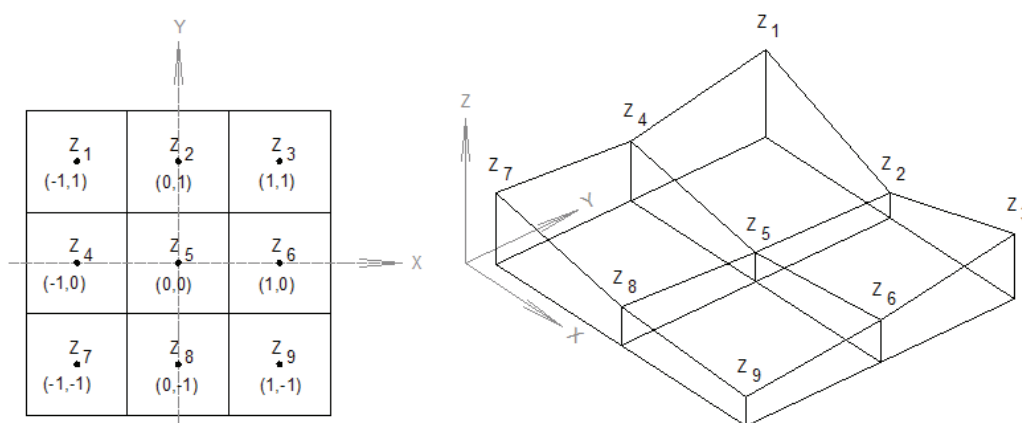


Figura 1. Ventana de búsqueda móvil de 3x3 celdas. Fuente: Adaptado de Hengl y Evans (2009) y Burrough y McDonnell (2005).

Zevenbergen y Thorne (1987) ajustaron una ecuación cuadrática de segundo orden sobre las cuatro celdas vecinas más cercanas en la ventana móvil, para lo cual emplearon el método de las diferencias finitas. El polinomio ajustado es:

$$Z = Ax^2y^2 + Bx^2y + Cxy^2 + Dx^2 + Ey^2 + Fxy + Gx + Hy + I \quad (2)$$

Donde:

A, B, C, D, E, F, G, H, I son los coeficientes a determinar y vienen dados por:

$$A = [(Z_1 + Z_3 + Z_7 + Z_9)/4 - (Z_2 + Z_4 + Z_6 + Z_8)/2 + Z_5]/d^4 \quad (3)$$

$$B = [(Z_1 + Z_3 - Z_7 - Z_9)/4 - (Z_2 - Z_8)/2]/d^3 \quad (4)$$

$$C = [(-Z_1 + Z_3 - Z_7 + Z_9)/4 - (Z_4 - Z_6)/2]/d^3 \quad (5)$$

$$D = [(Z_4 + Z_6)/2 - Z_5]/d^2 \quad (6)$$

$$E = [(Z_2 + Z_8)/2 - Z_5]/d^2 \quad (7)$$

$$F = (-Z_1 + Z_3 + Z_7 - Z_9)/4d^2 \quad (8)$$

$$G = (-Z_4 + Z_6)/2d \quad (9)$$

$$H = (Z_2 - Z_8)/2d \quad (10)$$

$$I = Z_5 \quad (11)$$

La primera derivada de la función cuadrática viene a ser:

$$\frac{\partial Z}{\partial x} = 2Axy^2 + 2Bxy + Cy^2 + 2Dx + Fy + G \quad (12)$$

$$\frac{\partial Z}{\partial y} = 2Ax^2y + Bx^2 + 2Cxy + 2Ey + Fx + H \quad (13)$$

El valor de las coordenadas en la celda central (Z_5) de la ventana móvil (Figura 1) es ($x=0$; $y=0$), por lo tanto:

$$\frac{\partial Z}{\partial x} = G \quad (14)$$

$$\frac{\partial Z}{\partial y} = H \quad (15)$$

La segunda derivada corresponde a:

$$\frac{\partial^2 Z}{\partial x^2} = 2Ay^2 + 2By + 2D \quad (16)$$

$$\frac{\partial^2 Z}{\partial y^2} = 2Ax^2 + 2Cx + 2E \quad (17)$$

$$\frac{\partial^2 Z}{\partial x \partial y} = 4Axy + 2Bx + 2Cy + F \quad (18)$$

Dadas las coordenadas de la celda central ($x=0$; $y=0$), se tiene:

$$\frac{\partial^2 Z}{\partial x^2} = 2D \quad (19)$$

$$\frac{\partial^2 Z}{\partial y^2} = 2E \quad (20)$$

$$\frac{\partial^2 Z}{\partial x \partial y} = F \quad (21)$$

De acuerdo a este algoritmo, la Pendiente del terreno (β) viene dada por (Olaya, 2009):

$$\beta = \arctan \sqrt{(\partial Z / \partial x)^2 + (\partial Z / \partial y)^2} = \arctan \sqrt{G^2 + H^2} \quad (22)$$

La Orientación de la pendiente (O) está dada por (Olaya, 2009):

$$O = 180 - \arctan \left(\frac{H}{G} \right) + 90 \left(\frac{G}{|G|} \right) \quad (23)$$

La Curvatura (C) viene dada por (Moore et al., 1993):

$$C = \frac{2D \cos^2 \phi + 2F \cos \phi \sin \phi + 2E \sin^2 \phi}{(G^2 + H^2 + 1)^{\frac{1}{2}} \cos \gamma} \quad (24)$$

Donde:

γ es el ángulo entre la normal a la superficie y la sección horizontal (Figura 2).

ϕ es el ángulo entre la tangente de la sección normal dada y el eje X (Figura 2).

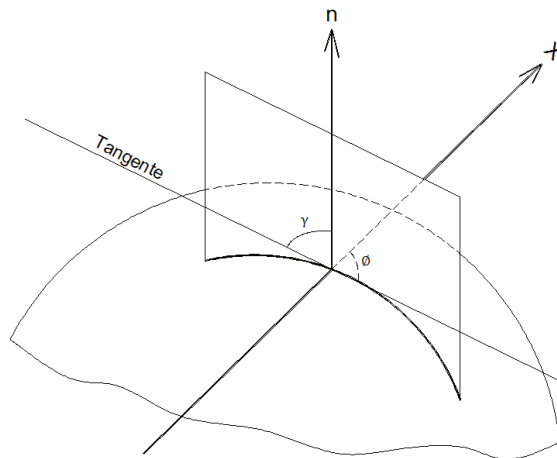


Figura 2. Componentes de la Curvatura del terreno.

Para la Curvatura Vertical (CV) se cumple que:

$$\cos\gamma = 1 \quad (25)$$

$$\cos\emptyset = \frac{G}{[(G^2 + H^2)(G^2 + H^2 + 1)]^{\frac{1}{2}}} \quad (26)$$

$$\sen\emptyset = \frac{H}{[(G^2 + H^2)(G^2 + H^2 + 1)]^{\frac{1}{2}}} \quad (27)$$

Así que:

$$CV = \frac{2(DG^2 + EH^2 + FGH)}{(G^2 + H^2)(G^2 + H^2 + 1)^{\frac{3}{2}}} \quad (28)$$

Similarmente para la Curvatura Horizontal (CH):

$$\cos\gamma = \left[\frac{(G^2 + H^2)}{(G^2 + H^2 + 1)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (29)$$

$$\cos\emptyset = \frac{H}{(G^2 + H^2)^{\frac{1}{2}}} \quad (30)$$

$$\sen\emptyset = \frac{G}{(G^2 + H^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (31)$$

Por lo tanto:

$$CH = \frac{2(DH^2 - FGH + EG^2)}{(G^2 + H^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (32)$$

Según Burrough y McDonnell (2005) este algoritmo es superior al algoritmo de Máxima Pendiente, basado en ocho celdas vecinas (Travis et al., 1975) y similar al algoritmo de ocho celdas de Horn (1981), comparándolos con base en los errores residuales RMS generados para pendiente y orientación. Jones (1998) recomienda el algoritmo de Zevenbergen y Thorne (1987) para superficies suavizadas y el de Horn (1981) para superficies rugosas, en el cálculo de pendiente y orientación. Castillejo et al (2006) recomiendan el algoritmo de Horn para el cálculo de la pendiente, al compararlo con los métodos de Zevenbergen-Thorne y Sharpnack y Atkins (1969). Por su parte Schmidt et al. (2003) recomiendan los algoritmos de Evans-Young (Shary et al., 2002) y Shary (Shary, 1995) para el cálculo de curvaturas, en comparación con Zevenbergen-Thorne.

APÉNDICE 4. Algoritmos geomorfométricos para la determinación del Índice de Llanura de Fondos de Valles y de Cimas de Crestas.

El algoritmo se basa en las capas de Pendiente y el Percentil de Elevación. Este último es la categoría de la elevación de una celda con respecto a las celdas vecinas en una región circular de radio dado. La categoría se calcula como la proporción del número de celdas de elevación baja, en relación al número total de celdas en la región circundante. Un valor bajo indica que la celda está en posición baja en el paisaje local y las demás celdas están más altas. El índice se aplica a diferentes escalas separadamente, lo que permite representar los valles en escalas pequeñas sin detalles innecesarios pero evitando que sean descartados los pequeños escarpes en la generalización de los datos. Una localidad tendrá un fondo de valle en una escala determinada si éste es lo suficientemente bajo y plano en esa escala y es suficientemente plano (pero no necesariamente bajo) en las escalas más detalladas.

En cada paso de cálculo el tamaño de la celda del DEM se incrementa por un factor de tres y el umbral de Pendiente se reduce por un factor de dos.

El algoritmo realiza una transformación no lineal del dato de entrada (x) para que se ubique entre 0 y 1, de acuerdo a la siguiente expresión:

$$N(x, t, p) = \frac{1}{1 + (\frac{x}{t})^p} \quad (33)$$

Donde:

N es el valor transformado del dato de entrada,

x es el dato de entrada (Pendiente, Percentil de Elevación, Función intermedia),

t es el umbral de la función para el dato de entrada,

p es el factor de forma para el dato de entrada.

En general el método sigue los siguientes pasos:

- Primer paso, a escala original
 - o Se calcula la pendiente (S_1) y se transforma al Índice de Llanura F1 (valores entre 0 y 1) con la función N , utilizando los parámetros $t=16\%$ (umbral de Pendiente) y $p=4$:

$$F1 = N(\beta_1, 16, 4) \quad (34)$$

- o Se calcula el Percentil de Elevación (PE_1) con un radio de tres celdas y se transforma a Índice de Bajeza P1 (valores entre 0 y 1) con la función N, utilizando los parámetros $t=0.4$ (umbral de Percentil de Elevación) y $p=3$:

$$P1 = N(PE_1, 0.4, 3) \quad (35)$$

- o Se combinan los dos índices para producir un índice de Llanura de Fondos de Valle Preliminar PVB1:

$$PVB1 = F1 * P1 \quad (36)$$

Los índices F1 y P1 con valores mayores a 0.5 tienen suficiente llanura o bajeza para ser considerados fondos de valle, al evaluarlos independientemente. En conjunto, un valor mayor de 0.25 es por lo tanto un fondo de valle, pero para compensar esta desviación de la escala 0 a 1, PVB1 se debe transformar:

$$VF1 = 1 - N(PVB1, 0.3, 4) \quad (37)$$

Se considera que los valores de VF1 menores a 0.5 no son fondos de valle, ya que son demasiado empinados o están demasiado altos.

- Segundo paso

- o El DEM mantiene su resolución original pero el umbral de Pendiente se reduce a la mitad:

$$F2 = N(\beta_2, 8, 4) \quad (38)$$

- o El Percentil de Elevación utiliza un radio de 6 celdas:

$$P2 = N(PE_2, 0.4, 3) \quad (39)$$

- o Se obtiene el índice combinado:

$$PVB2 = F2 * P2 \quad (40)$$

- o Se ajusta el índice:

$$VF2 = 1 - N(PVB2, 0.3, 4) \quad (41)$$

- o Se combinan los dos pasos de tal forma que las áreas identificadas como fondos de valle por VF2 tomen valor aproximados entre 1.5 y 2 y las áreas excluidas por VF2 pero incluidas por VF1, tomen valores entre 0.5 y 1. Este resultado se logra con el índice acumulado ponderado:

$$MRVBF2 = W_2(1 + VF2) + (1 - W_2)VF1 \quad (42)$$

Siendo:

$$W_2 = 1 - N(VF2, 0.4, 6.68) \quad (43)$$

- Pasos restantes

Los pasos restantes del algoritmo siguen el procedimiento descrito en el paso 2 pero el DEM es suavizado (escala) y el tamaño de las celdas se ajusta (resolución) en cada paso de cálculo (L). El índice final MRVBF es un valor continuo. Valores menores que 0.5 son áreas que no corresponden a fondos de valle. Valores de 0.5 a 1.5 son considerados como los fondos de valle más inclinados y más pequeños identificables a la resolución original. Los fondos de valle más planos y más grandes son representados por valores que van de 1.5 a 2.5, 2.5 a 3.5 y así sucesivamente.

- Índice complementario de Llanura de Cimas de Crestas

Este índice se genera de manera similar, pero las partes superiores del paisaje se identifican remplazando la siguiente función no lineal en las Ecuación 35 y 39:

$$P1 = N(1 - PE_1, 0.35, 3) \quad (44)$$

APÉNDICE 5. Algoritmos geomorfológicos para la determinación de la Radiación Solar Potencial.

De acuerdo a este algoritmo, la radiación superficial neta está dada por:

$$R_n^* = S_n^* + L_n^* \quad (45)$$

Donde:

R_n^* es la radiación neta superficial, para la superficie terrestre real (no plana, es decir, modificada por la topografía),

S_n^* es la radiación neta de onda corta, modificada por la topografía,

L_n^* es la radiación neta de onda larga, modificada por la topografía.

La exposición topográfica neta al flujo de radiación, sin tomar en cuenta las peculiaridades del clima local y estacional, viene dada por:

$$S_n^* = (S_s^* + S_h^* + S_t^*)(1 - r) \quad (46)$$

Donde:

S_s^* es la radiación solar directa recibida del disco solar y modificada por la topografía,

S_h^* es la radiación solar difusa recibida del hemisferio celeste, modificada por la topografía,

S_t^* es la radiación solar recibida por reflexión de la topografía circundante,

r es el factor de reflectancia superficial (albedo).

5.5.1.1. Radiación neta de onda corta modificada por la topografía (S_n^*)

a. Radiación solar directa modificada por la topografía (S_s^*)

En cada celda del DEM, la elevación y azimut del Sol se determina con las siguientes expresiones:

$$\sin \theta = \cos \lambda * \cos \delta * \cos \omega + \sin \lambda * \sin \delta \quad (47)$$

$$\cos \Phi = \frac{\cos \delta * \cos \omega - \sin \theta * \cos \lambda}{\sin \lambda * \cos \theta} \quad (48)$$

$$\delta = 23.45 * \sin\left(\frac{360^\circ * [284 + J]}{365}\right) \quad (49)$$

$$\omega = 15^\circ * (12 - t) \quad (50)$$

Donde:

θ y Φ son las coordenadas horizontales del Sol que definen su posición en el cielo, correspondientes a (Figuras 1 y 2):

θ el ángulo de elevación del Sol sobre el horizonte celestial del observador (o de la celda),

Φ el azimut del Sol,

λ es la latitud local,

δ y ω son las coordenadas horarias del Sol ($^{\circ}$), correspondientes a (Figura 1 y 2):

δ declinación solar: ángulo entre el plano ecuatorial y la línea que une los centros del Sol y la Tierra. Este valor cambia continuamente en el tiempo, entre $+23.45^{\circ}$ y -23.45° ,

ω ángulo horario: que indica el desplazamiento angular del Sol sobre el plano de la trayectoria (eclíptica) solar, medido desde el meridiano correspondiente al mediodía solar hasta el meridiano local del punto de observación, en intervalos de la media hora local. Una hora corresponde a 15° ,

J es el número del día del año: $1 \leq J \leq 365$.

Un estimador de la radiación directa recibida en la superficie es el ángulo de iluminación solar, que corresponde al ángulo formado entre los rayos del Sol y un plano ortogonal al terreno (Figura 5-5). Viene dado por la expresión:

$$\cos v = \cos \beta * \sin \theta + \sin \beta * \cos \theta * \cos(\Phi - \alpha) \quad (51)$$

Donde:

v es el ángulo de iluminación solar

β es la pendiente del terreno (en la celda)

α es la orientación de la pendiente (en la celda).

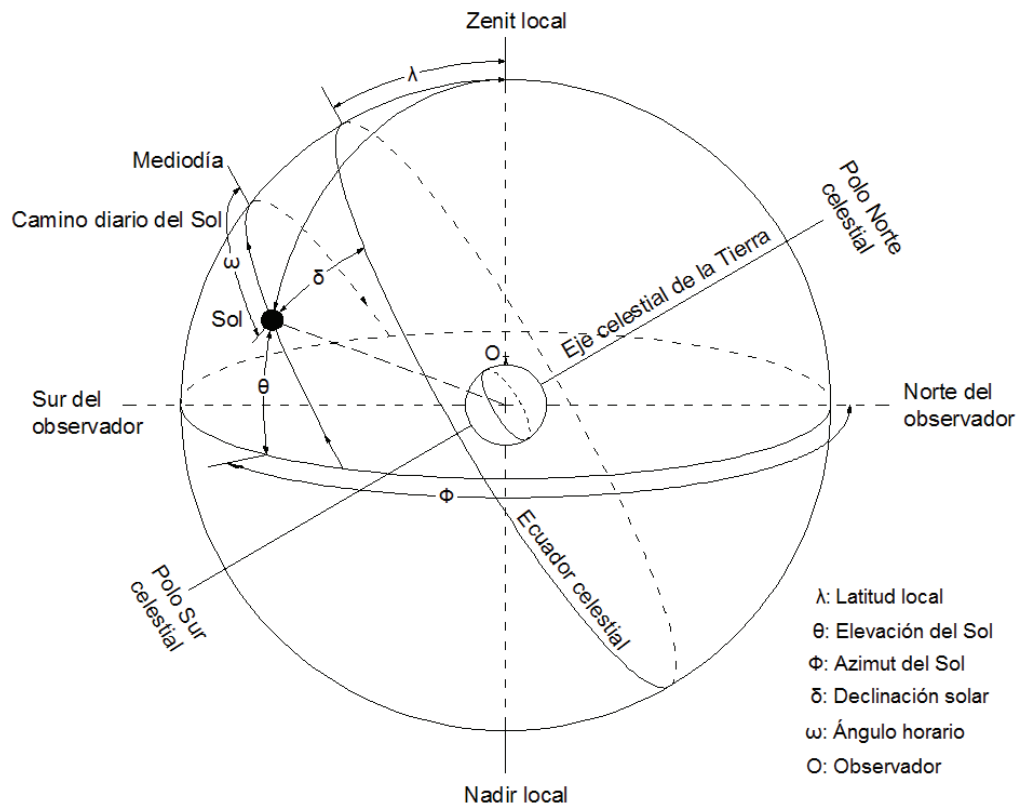


Figura 1. Coordenadas horizontales y horarias del Sol sobre la esfera celestrial. Fuente: Adaptado de Vera (2005).

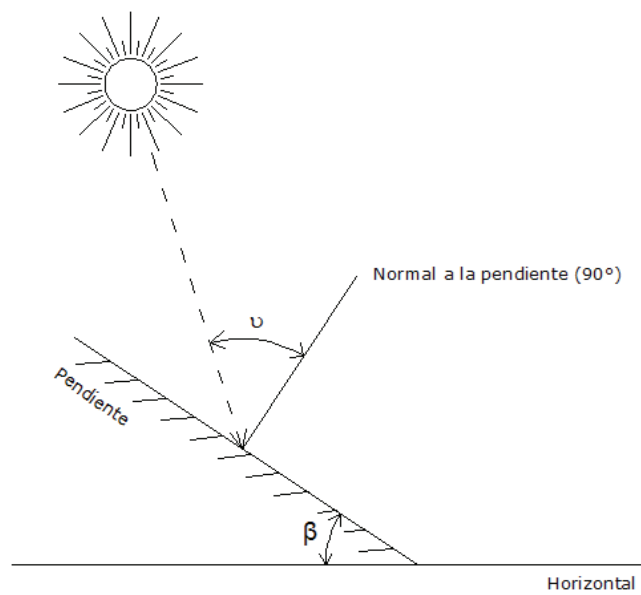


Figura 2. Parámetros verticales del Sol. Fuente: Schneider y Robbins (2001).

El ángulo de iluminación debe ser ajustado para eliminar las áreas sin radiación, que tienen dos procedencias:

- Áreas autosombreadas, donde el $\sin \theta \leq 0$,
- Áreas bajo sombras proyectadas, donde el ángulo vertical formado por la línea del azimut solar, en el punto de mayor elevación del terreno, y el plano horizontal, es mayor que el ángulo de elevación solar. Este ángulo se calcula con la expresión:

$$\varphi = \arctan\left(\frac{\Delta Z}{d}\right)_{max} \quad (52)$$

Donde:

d es la distancia al punto con mayor elevación sobre la línea del azimut solar, hasta una distancia dada de búsqueda,

ΔZ es el desnivel entre el punto de mayor elevación y el punto de la celda de cálculo,

φ es el ángulo del horizonte, definido como el ángulo máximo de elevación del terreno en la dirección del azimut solar, dentro de un radio de búsqueda seleccionado.

El ángulo de iluminación varía a lo largo de las horas del día (continuamente) y se utiliza para calcular la radiación solar directa horaria sobre la topografía real, pero se requieren datos de radiación horaria en estaciones de medición. AntoniĆ (1998) y AntoniĆ et al. (2000) desarrollaron un procedimiento para obtener un valor integrado promedio mensual de radiación directa diaria sin necesidad de los datos horarios:

$$S_{s(d)}^* = S_{s(d)} * K_{s(d)} \quad (53)$$

$$K_{s(d)} = \sum_{i=1}^n \mu * K_i \frac{\cos v_i}{\sin \theta_i} \quad (54)$$

$$K_i = \frac{S_{s(h)_i}}{S_{s(d)}} \quad (55)$$

Donde:

$S_{s(d)}^*$ es la radiación directa diaria, para la topografía real,

$S_{s(d)}$ es la radiación directa diaria, para la topografía ideal sin obstrucciones,

- $K_{s(d)}$ es la corrección topográfica diaria para la radiación directa (efecto topográfico acumulado durante el día),
- K_i es la porción que representa $S_{s(h)_i}$ en $S_{s(d)}$ para cada hora i del día.
- i es una hora particular,
- n es el número de horas del día.
- μ es una máscara binaria de las áreas sombreadas (sombreadas =0 ; no sombreadas = 1),
- $S_{s(h)}$ es la radiación solar directa horaria, en un terreno ideal sin obstrucciones topográficas.

El valor de K, que requiere los datos horarios $S_{s(h)}$, se obtiene a través de un modelo empírico el cual determina su valor para el día 15 de cada mes al mediodía solar. Este modelo se basa en medidas realizadas en estaciones piranométricas ubicadas en el hemisferio norte. Su algoritmo es:

$$K = b_0 + \frac{b_1 \theta^3}{\theta_{max}} + \frac{(b_2 \theta + b_3 \theta^2 + b_4 \theta^3)}{\theta_{max}^2} + \lambda \left[\frac{(b_5 \theta + b_6 \theta^2)}{\theta_{max}} + \frac{(b_7 \theta^2 + b_8 \theta^3)}{\theta_{max}^2} \right] \quad (56)$$

Donde:

$$\begin{aligned} b_0 &= 0.321419, & b_5 &= -0.077503, \\ b_1 &= 0.005221, & b_6 &= 0.001064, \\ b_2 &= 53.902664, & b_7 &= -0.252135, \\ b_3 &= 45.420267, & b_8 &= 0.002904. \\ b_4 &= -8.817633, \end{aligned}$$

La radiación solar directa en una superficie de elevación Z sin obstrucción topográfica, asumiendo una atmósfera homogénea en su composición química vertical, viene dada por:

$$S_s = \text{sen } \theta * S_c * \tau \quad (57)$$

$$\tau = e^{-\frac{\tau_z}{\text{sen } \theta}} \quad (58)$$

$$\tau_z = b \int_z^\infty l * \Delta Z \quad (59)$$

Donde:

S_c es la radiación exoatmosférica (la constante solar: 1 367 W/m²),

l es la densidad del aire en la capa que va desde el punto (o celda) de elevación Z hasta el tope de la atmósfera (ΔZ),

τ es la transmisividad de la atmósfera, que puede ser estimada en base a datos obtenidos con perfiles de radiosondeo, mediciones en terreno con estaciones piranométricas o por la Ecuación 58,

τ_z es el espesor óptico de la atmósfera,

b es un coeficiente que representa la fuerza de la transmisividad y puede ser derivado de modelos físicos de transferencia radiativa o de funciones empíricas de vapor de agua o agua precipitable y calibrados con datos reales.

b. Radiación solar difusa modificada por la topografía (S_h^*)

Para modelar la radiación solar difusa se calcula, para cada celda, el factor de vista del cielo, de acuerdo a la expresión:

$$\Psi_S = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} [\cos \beta * \cos^2 \varphi + \sin \beta * \cos(\Phi - \alpha) * (90 - \varphi - \sin \varphi * \cos \varphi)] d\Phi \quad (60)$$

Donde:

Ψ_S es el factor de vista del cielo, que varía de 1 (completamente despejado) a 0 (totalmente obstruido).

Asumiendo un cielo isotrópico, la radiación difusa afectada por la topografía, se calcula con la expresión:

$$S_h^* = S_h * \Psi_S \quad (61)$$

Donde:

S_h es la radiación solar difusa en un terreno ideal sin obstrucciones topográficas.

La radiación solar difusa en una superficie de elevación Z, sin obstrucciones topográficas y bajo un cielo claro (S_h), se estima por:

$$S_h = 0.5 * \text{sen } \theta * S_c * c * (1 - \tau) \quad (62)$$

Donde:

0.5 reduce el flujo de radiación recibida en la bóveda celeste a su componente descendente,

c es un coeficiente que considera las pérdidas del flujo al atravesar la atmósfera y debe ser calibrado con observaciones piranométricas.

c. Radiación solar recibida por reflexión (S_t)

Para modelar la radiación recibida en un hemisferio obstruido por el terreno circundante, en condiciones ideales de isotropía, se requiere calcular el factor de vista del terreno (Ψ_t):

$$\Psi_t \approx \frac{1 + \cos \beta}{2} - \Psi_s \quad (63)$$

La radiación recibida por reflexión viene dada por:

$$S_t = \Psi_t * (S_{s(prom)}^* + S_{h(prom)}^*) * r \quad (64)$$

Donde:

$S_{s(prom)}^*$ y $S_{h(prom)}^*$ son la radiación directa y difusa promediadas sobre el terreno circundante, visible desde el punto o celda,

r es el albedo promedio del terreno circundante.

5.5.1.2. Radiación neta de onda larga modificada por la topografía (L_n^*)

La radiación de onda larga de una superficie obstruida por la topografía circundante se calcula por:

$$L_n^* = L_n * \Psi_s + L_{(prom)} * \Psi_t \quad (65)$$

Donde:

$L_{(prom)}$ es la radiación de onda larga promediada de la superficie visible,

L_n es la radiación neta de onda larga en una superficie completamente despejada (plana).

La radiación de onda larga (L_n) puede ser estimada por:

$$L_n = L_a - L_s \quad (66)$$

$$L_s = \sigma * T_s^4 \quad (67)$$

$$L_a = 1.24 * \left(\frac{e}{T_l}\right)^{\frac{1}{7}} * \left(\frac{P_z}{P_o}\right) * \sigma * T_l^4 \quad (68)$$

Donde:

L_a es la radiación de onda larga recibida desde las nubes, el polvo atmosférico y algunos gases atmosféricos (vapor de agua, CO₂, etc.),

L_s es la radiación de onda larga emitida desde la superficie, de acuerdo a su temperatura,

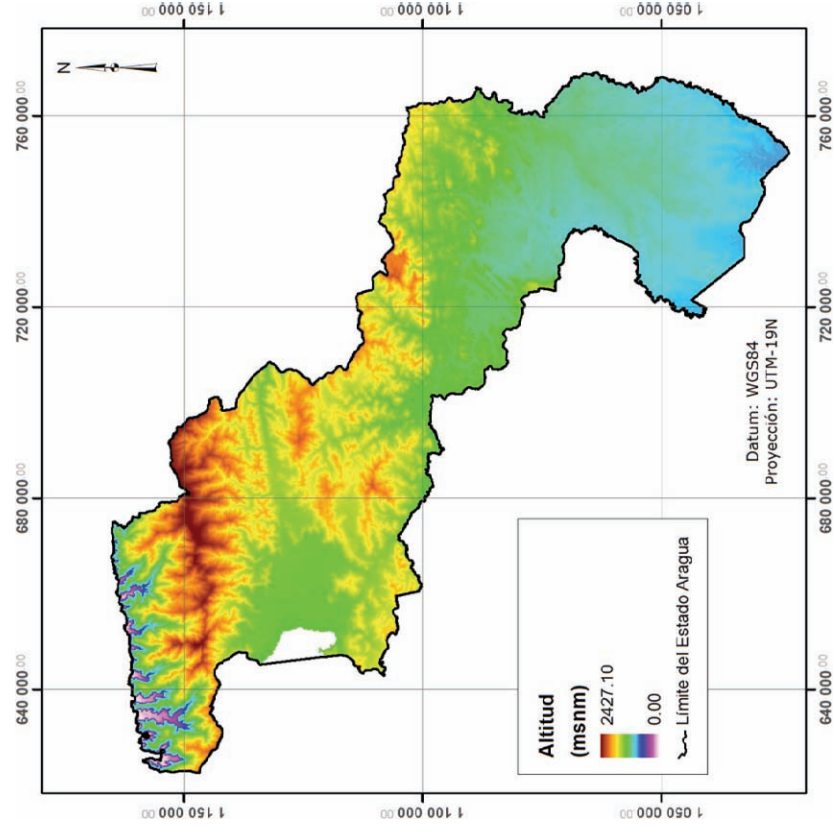
σ es la constante de Stephan-Boltzmann ($5.6693 \times 10^{-8} W/m^2 K^4$),

T_s y T_l son la temperatura de la superficie y del aire, respectivamente (°K),

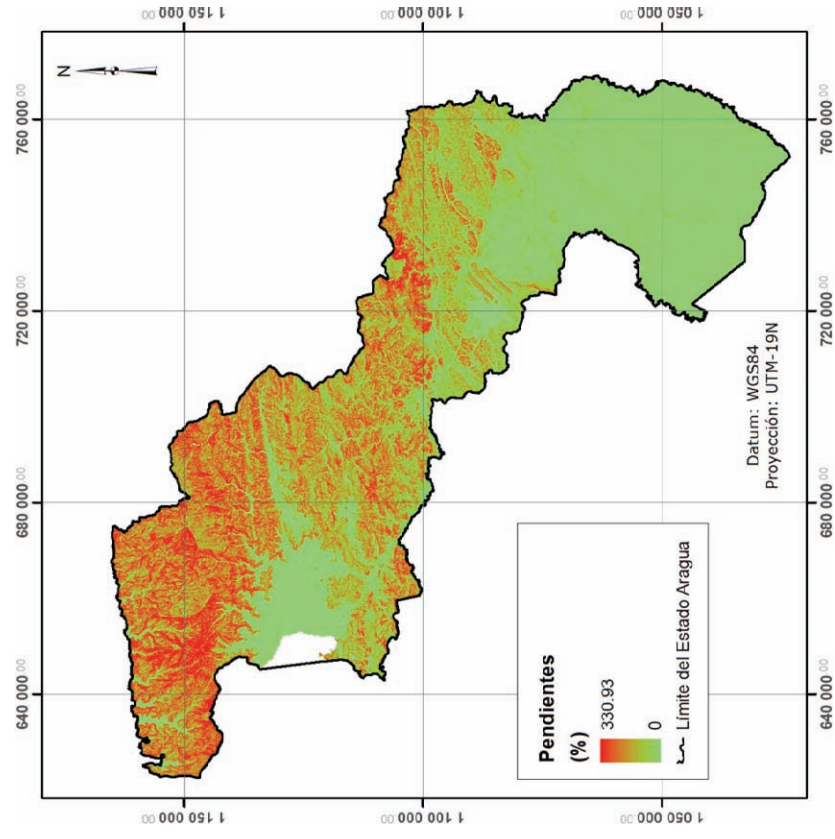
P_z y P_o son la presión del aire a la altitud Z y al nivel del mar, respectivamente (hPa),

e es la presión de vapor de agua (hPa).

APÉNDICE 6. Variables geomorfológicas básicas.

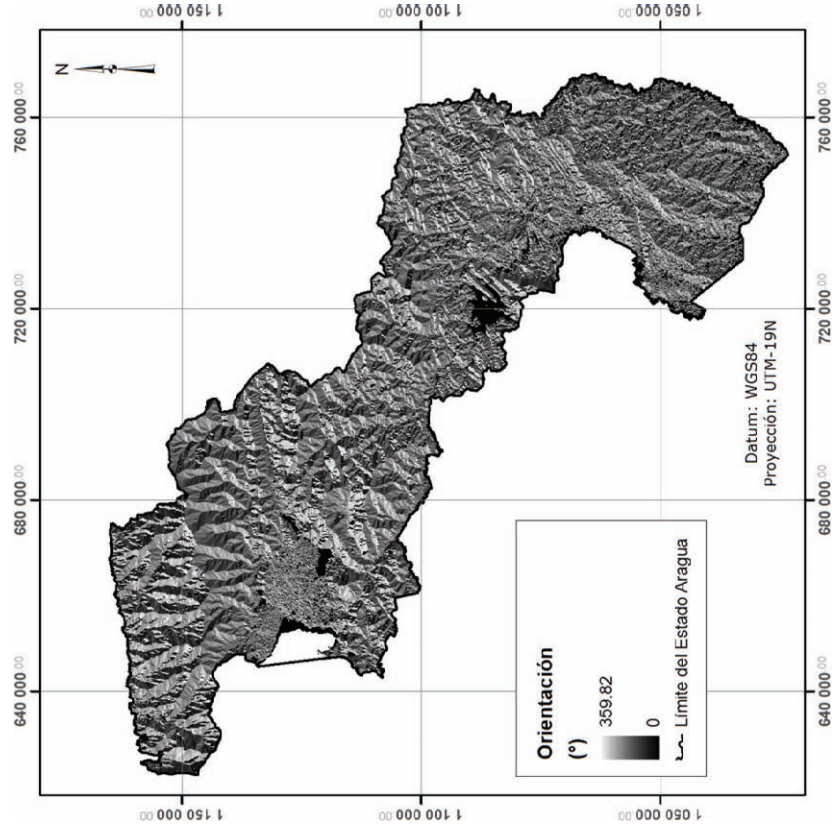


Altitud (msnm).

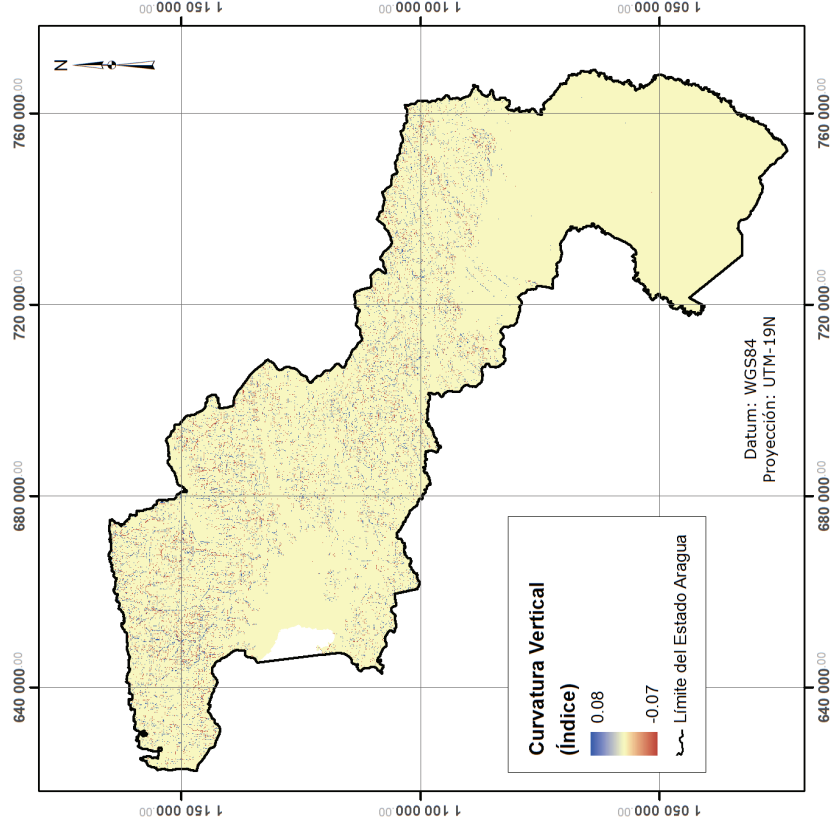


Pendiente del Terreno (%).

... Apéndice 6. Continuación.

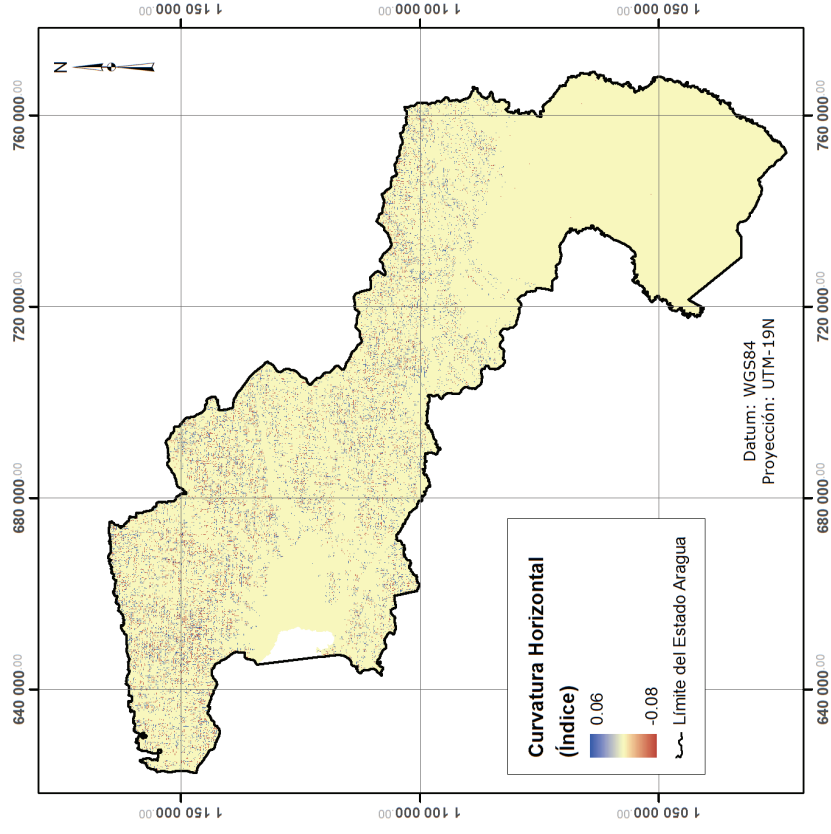


Orientación de la Pendiente (°).

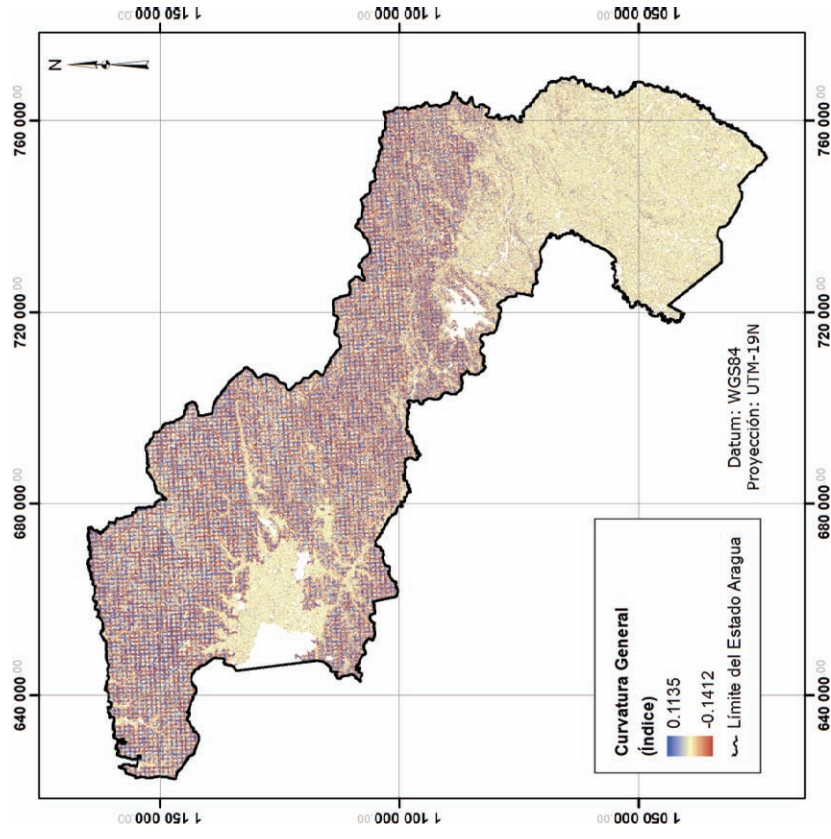


Curvatura Vertical.

... Apéndice 6. Continuación.

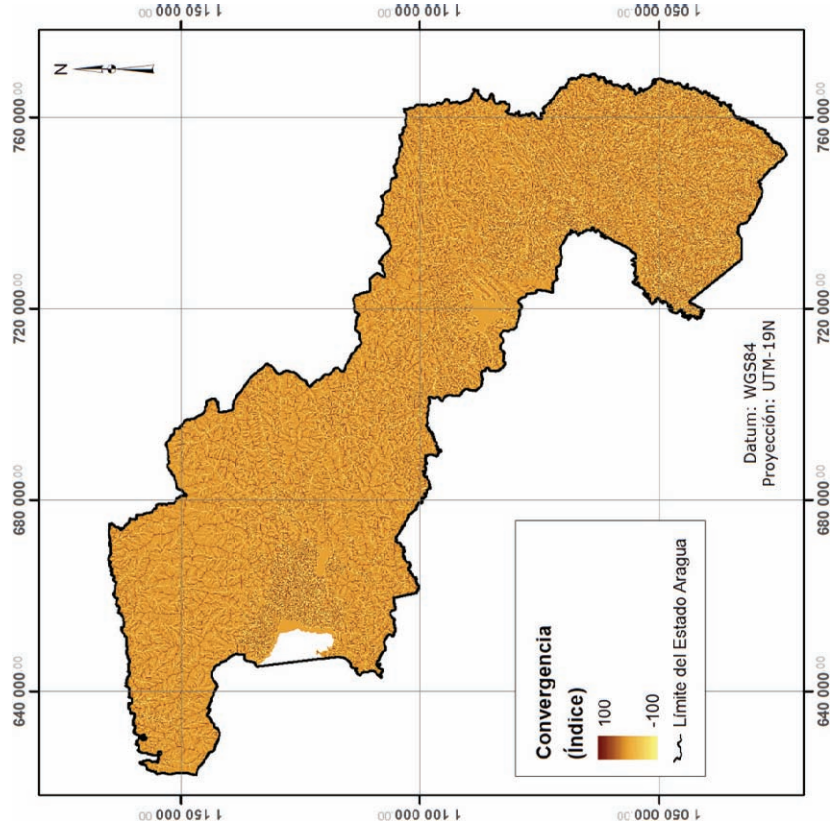


Curvatura Horizontal.

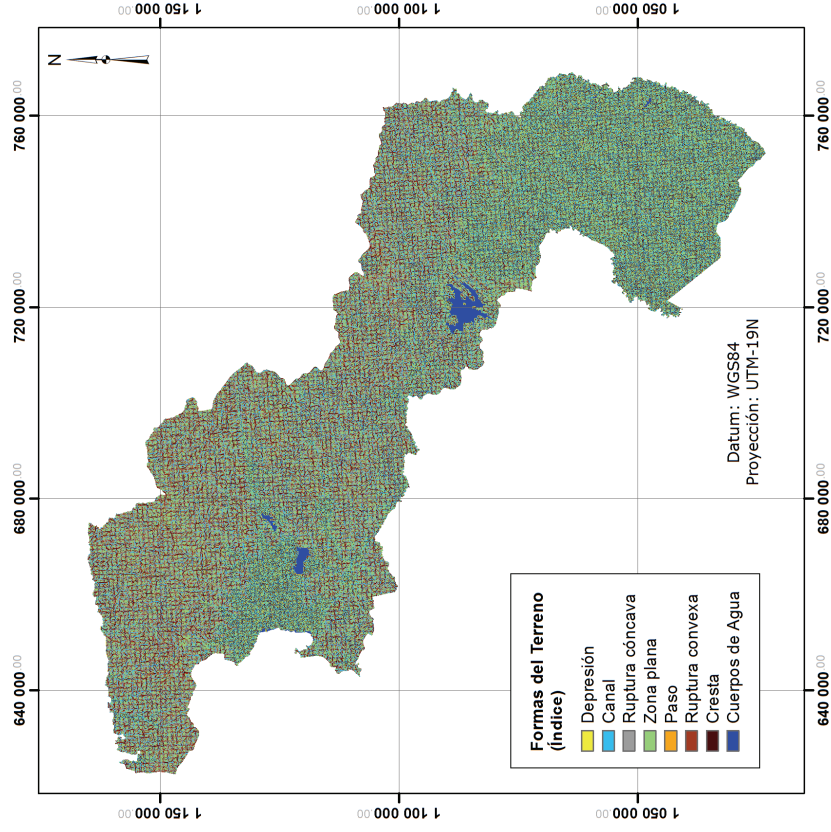


Curvatura General.

... Apéndice 6. Continuación.

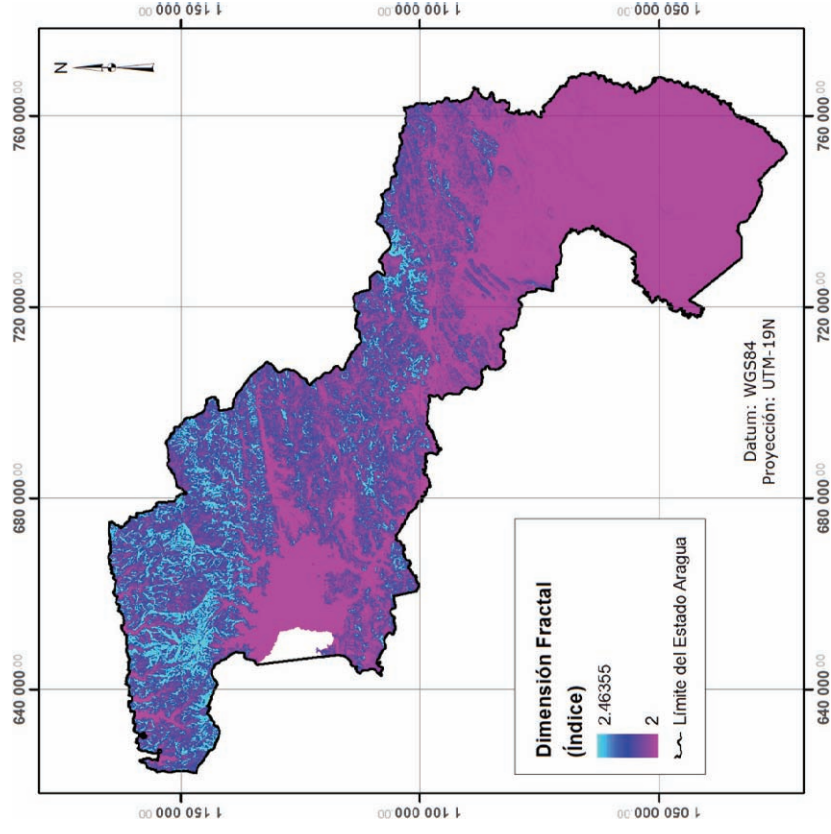


Índice de Convergencia.

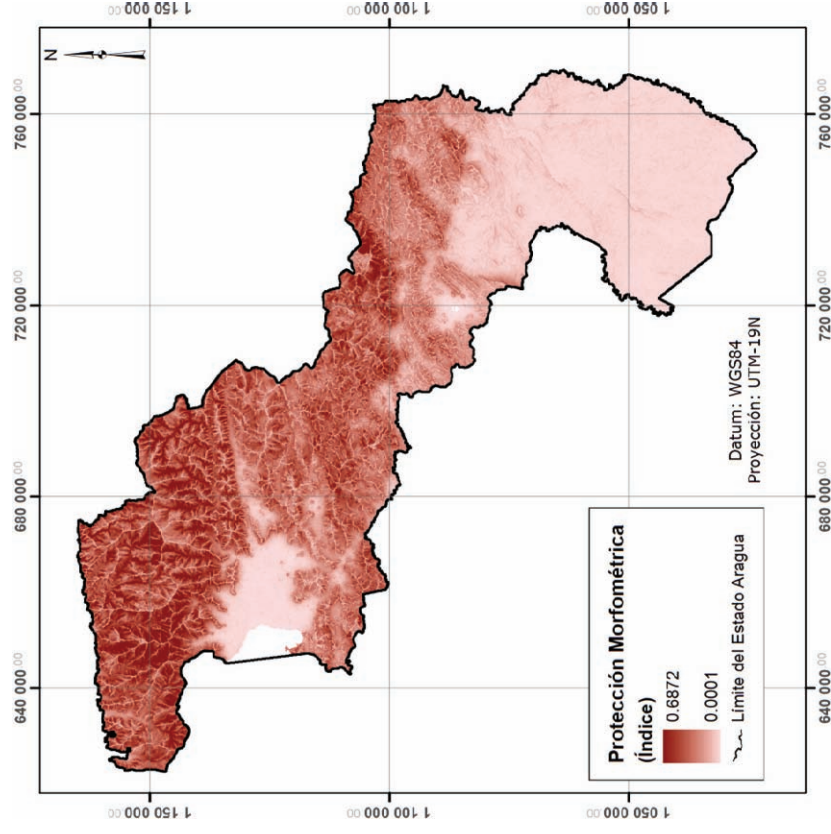


Formas del Terreno.

... Apéndice 6. Continuación.

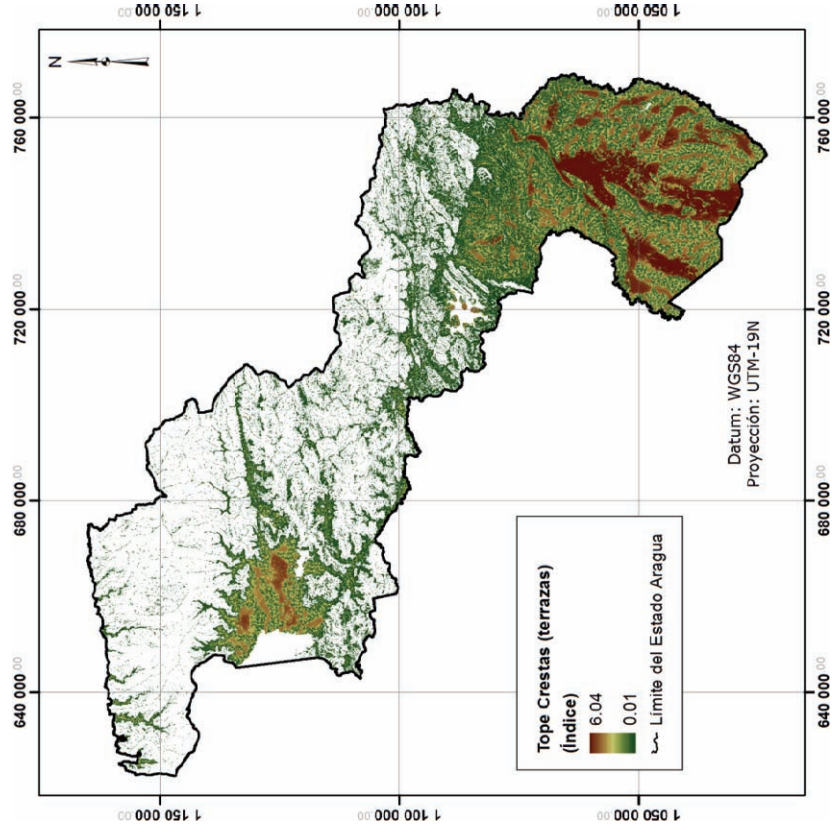


Dimensión Fractal.



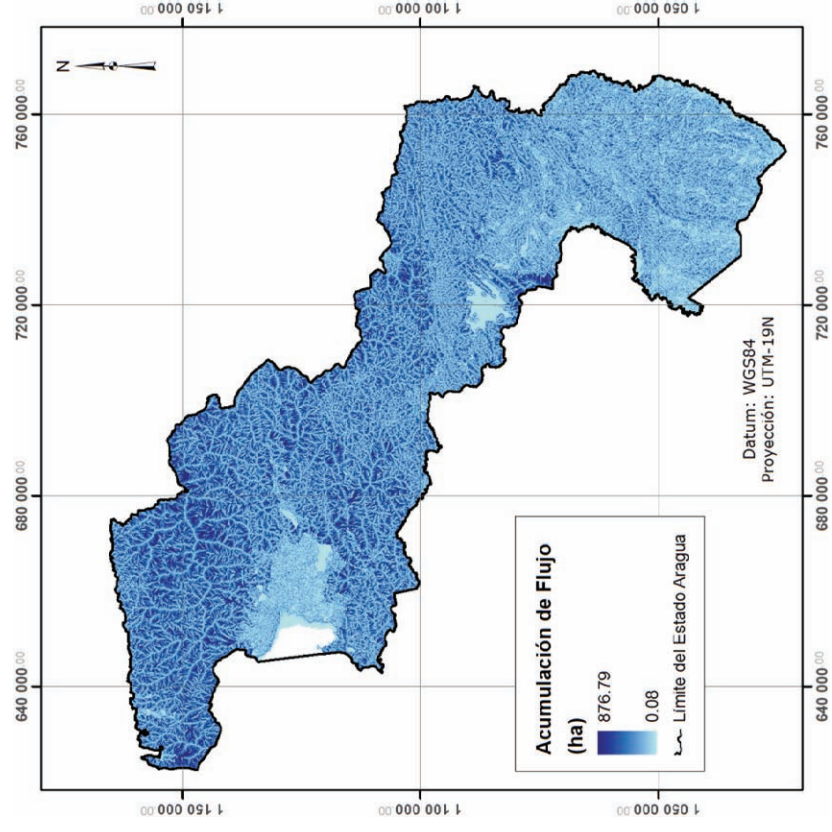
Índice de Protección Morfométrica.

... Apéndice 6. Continuación.

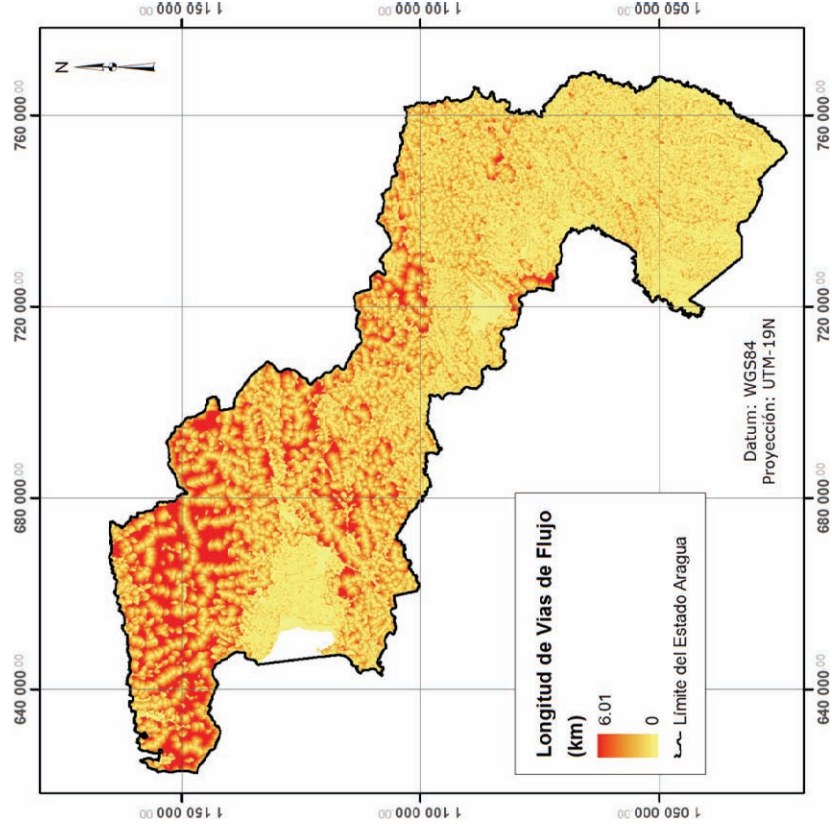


Índice de Llanura de Topes de Crestas (terrazas o mesetas).

APÉNDICE 7. Variables geomorfológicas hidrológicas.

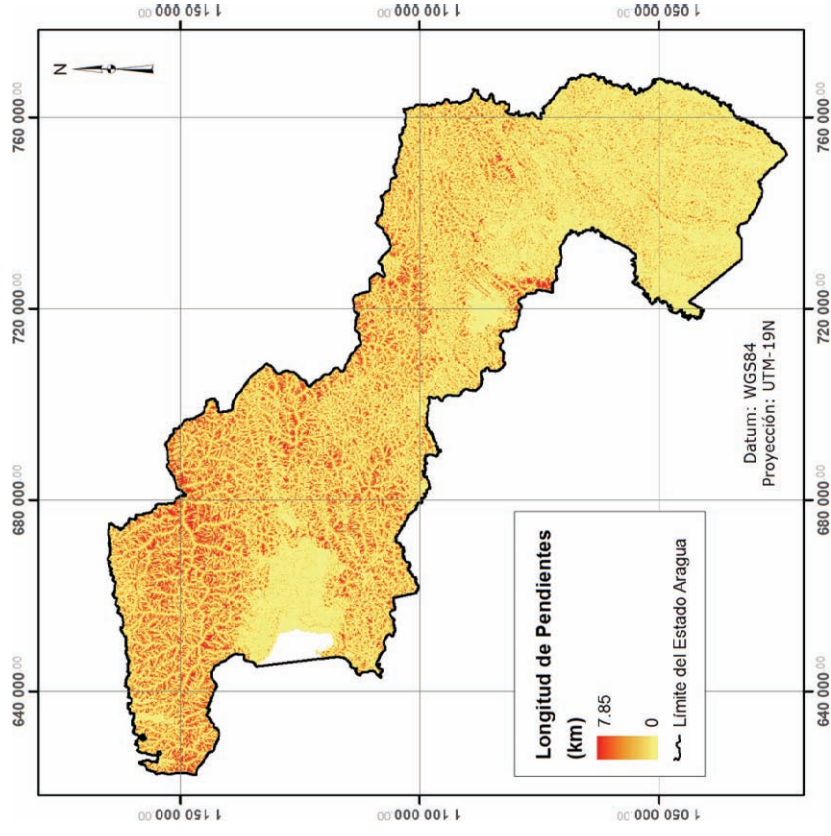


Acumulación de Flujo (ha).

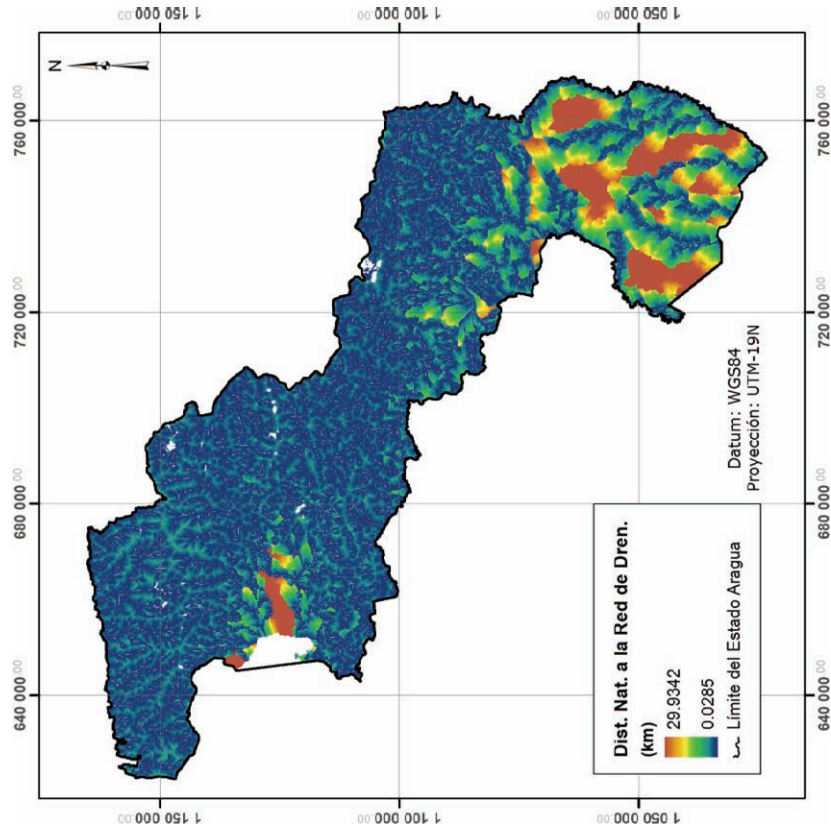


Longitud de las Vías de Flujo (km).

... Apéndice 7. Continuación.

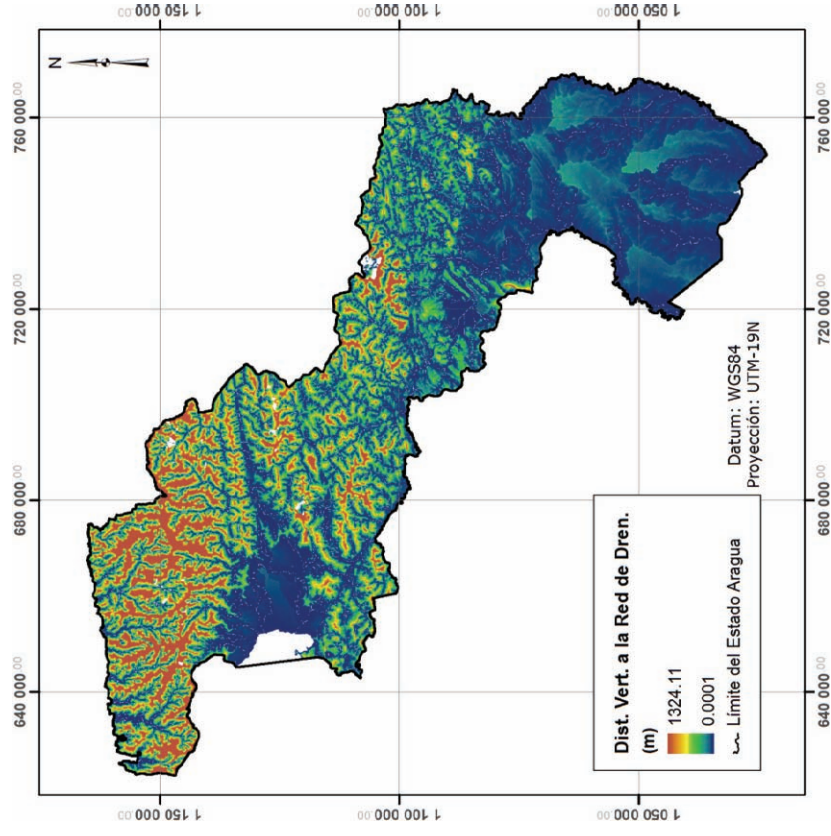


Longitud de Pendientes (km).

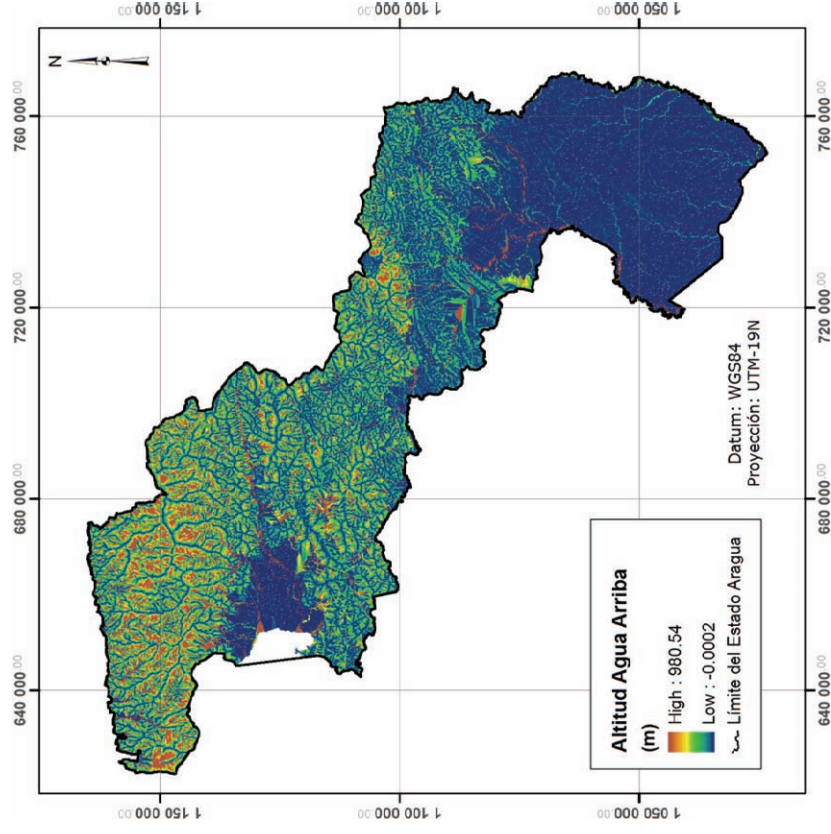


Distancia Natural (inclinada) a la Red de Drenajes (km).

... Apéndice 7. Continuación.

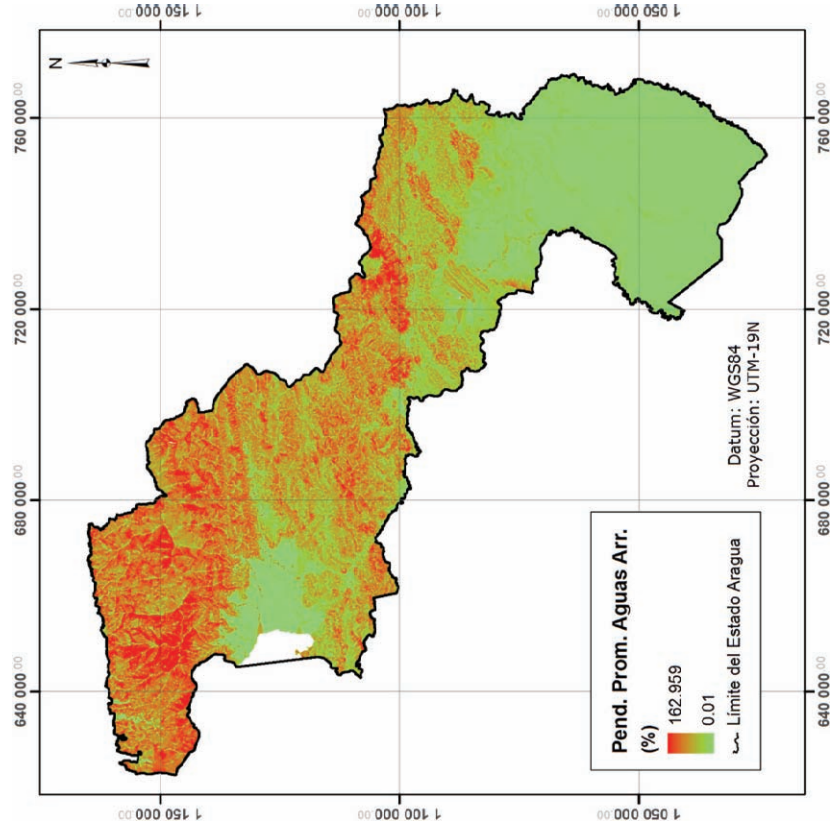


Distancia Vertical a la Red de Drenajes (m).

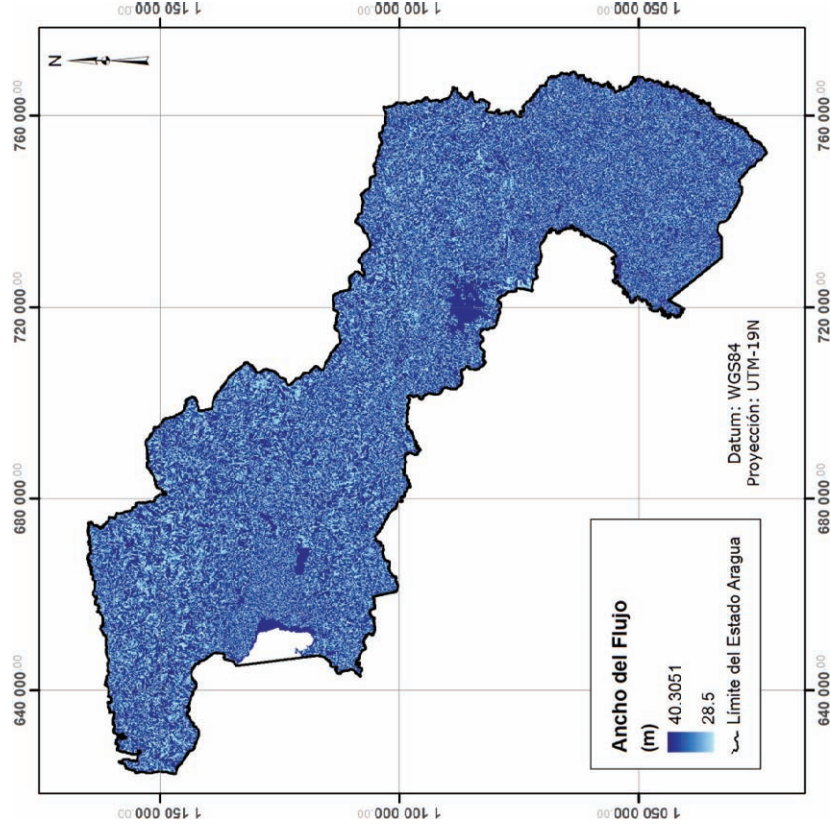


Altitud Promedio Aguas Arriba (m).

... Apéndice 7. Continuación.

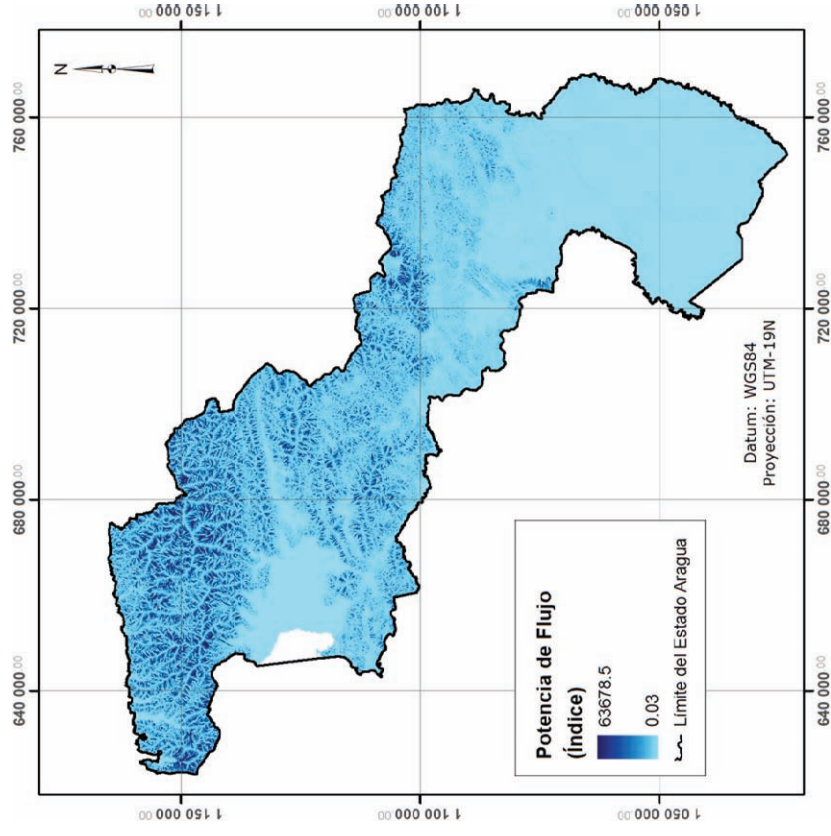


Pendiente Promedio Aguas Arriba (%).

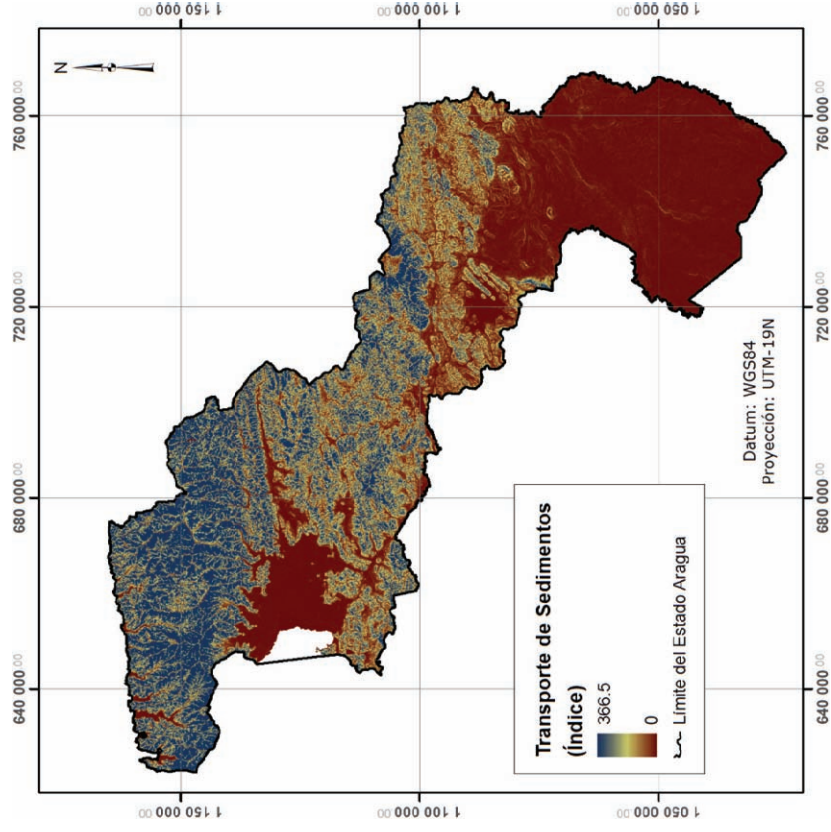


Ancho del Flujo (m).

... Apéndice 7. Continuación.

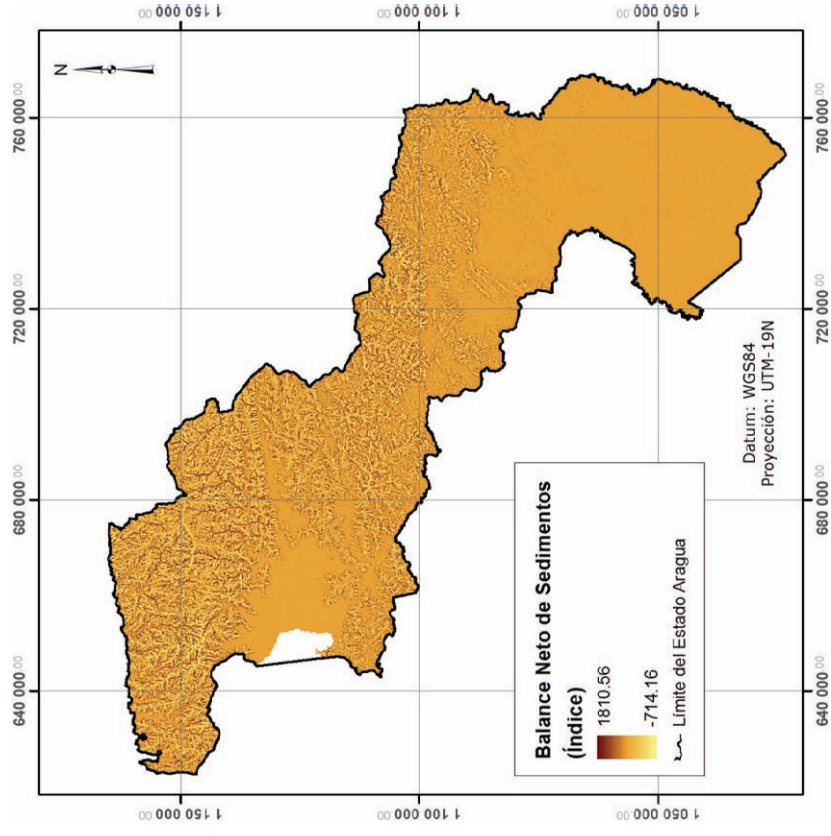


Índice de Potencia de Flujo.

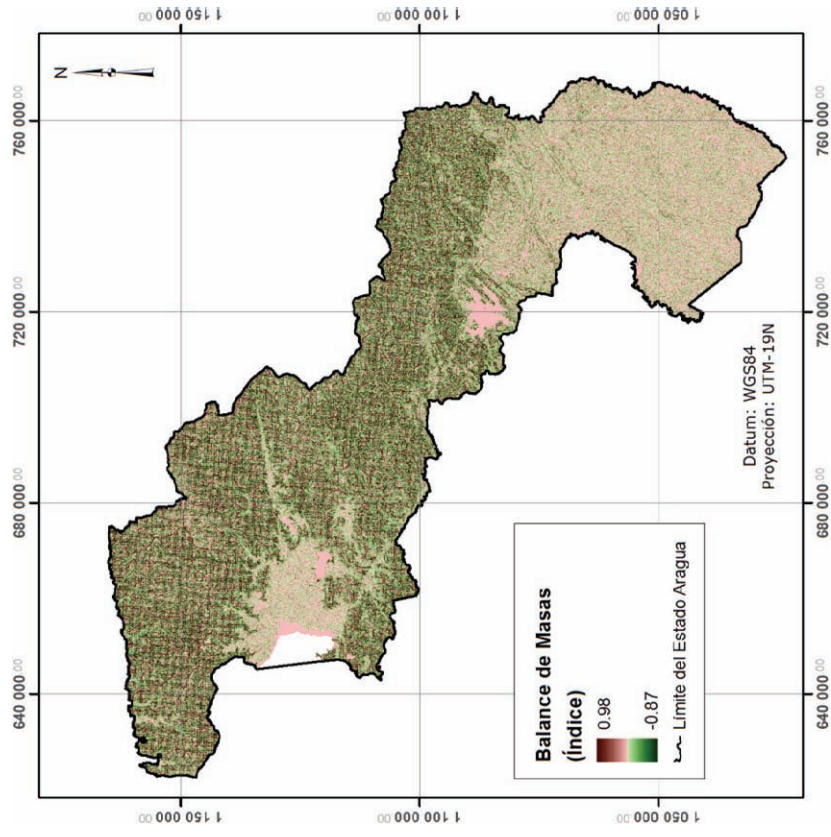


Índice de Transporte de Sedimentos.

... Apéndice 7. Continuación.

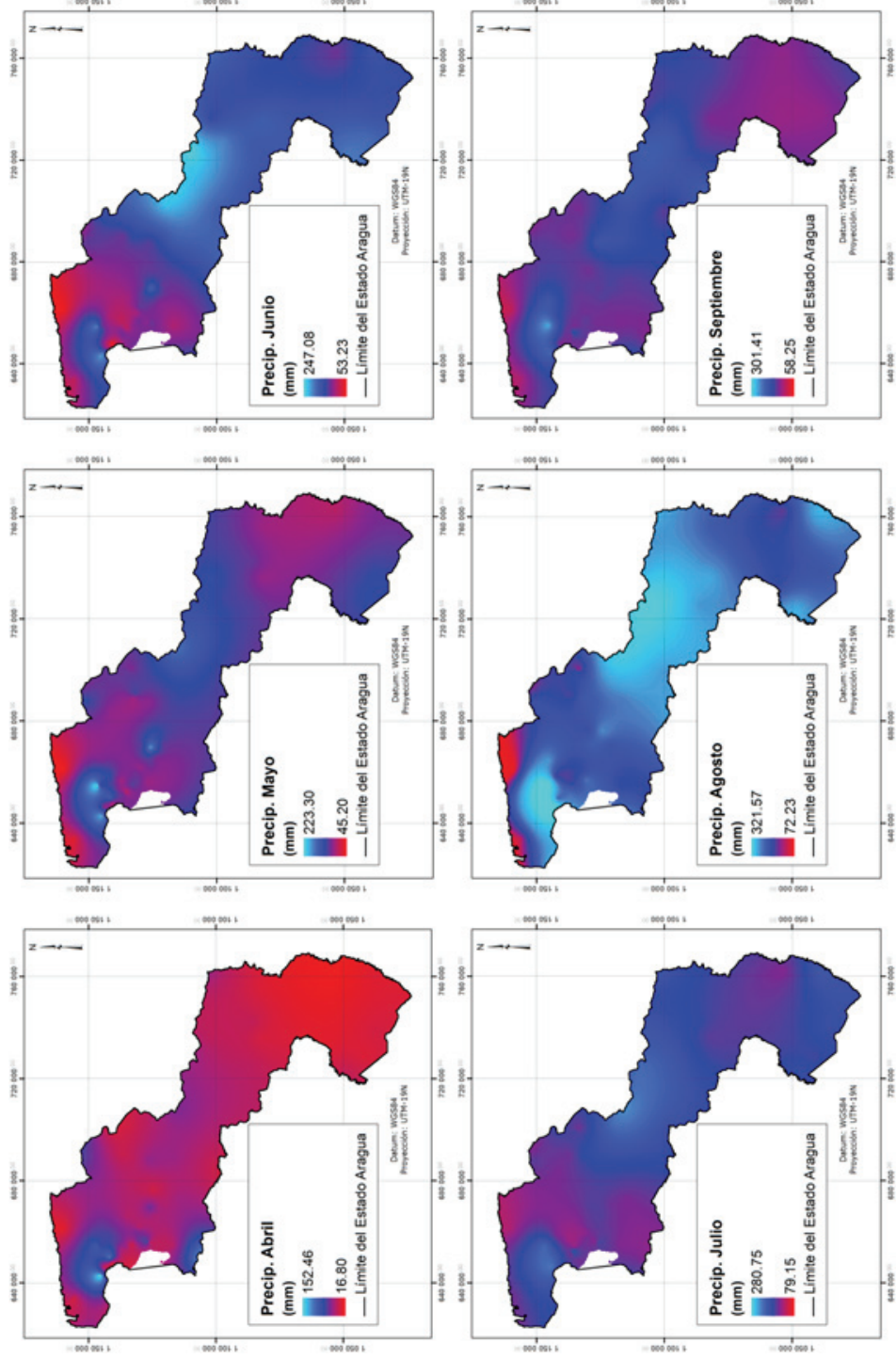


Balance Neto.

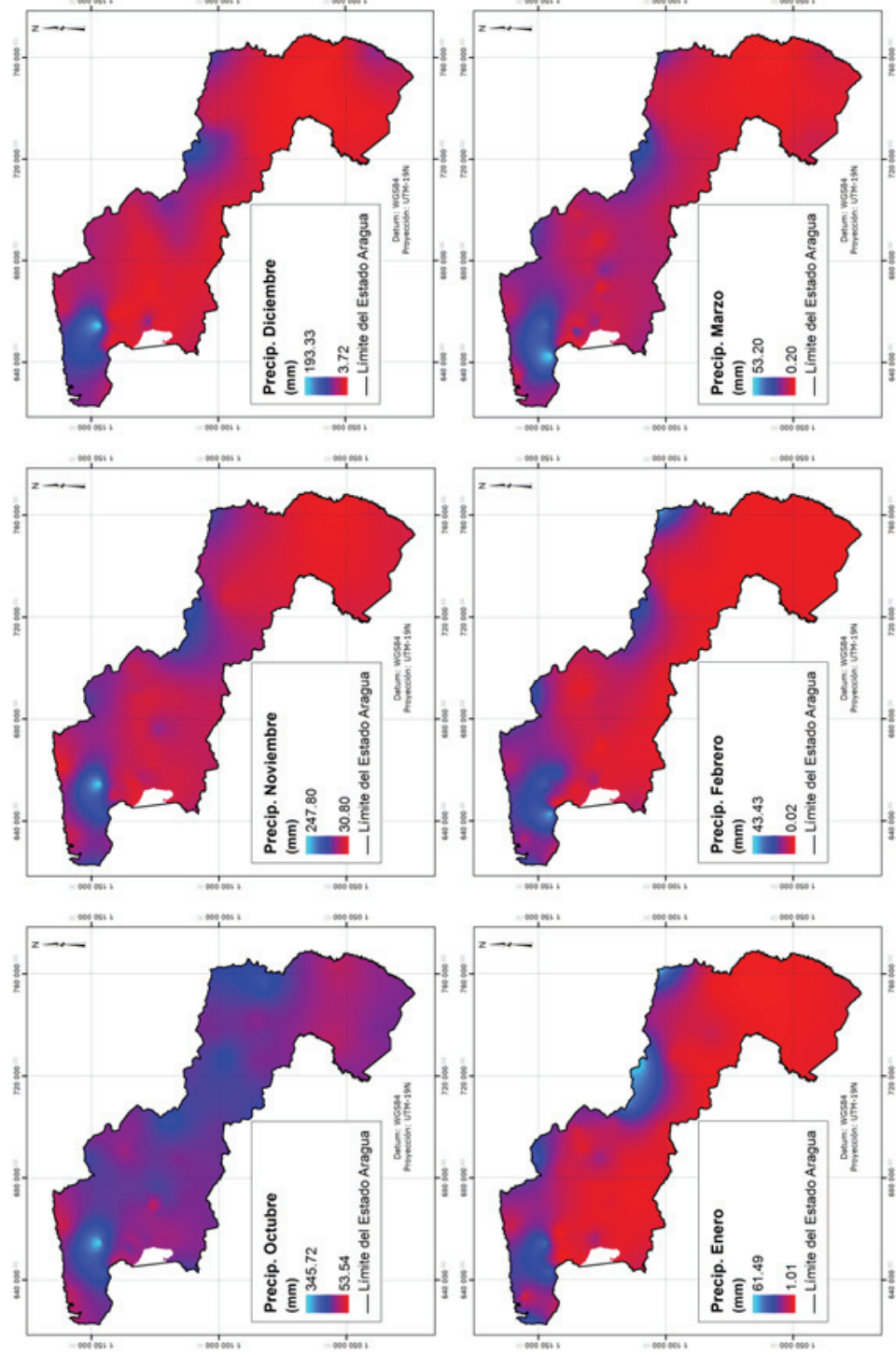


Índice de Balance de Masas.

APÉNDICE 8. Precipitación promedio mensual del área de estudio.



... Apéndice 8. Continuación.



APÉNDICE 9. Modelo de regresión lineal múltiple para la evaporación mensual en el Estado Aragua.

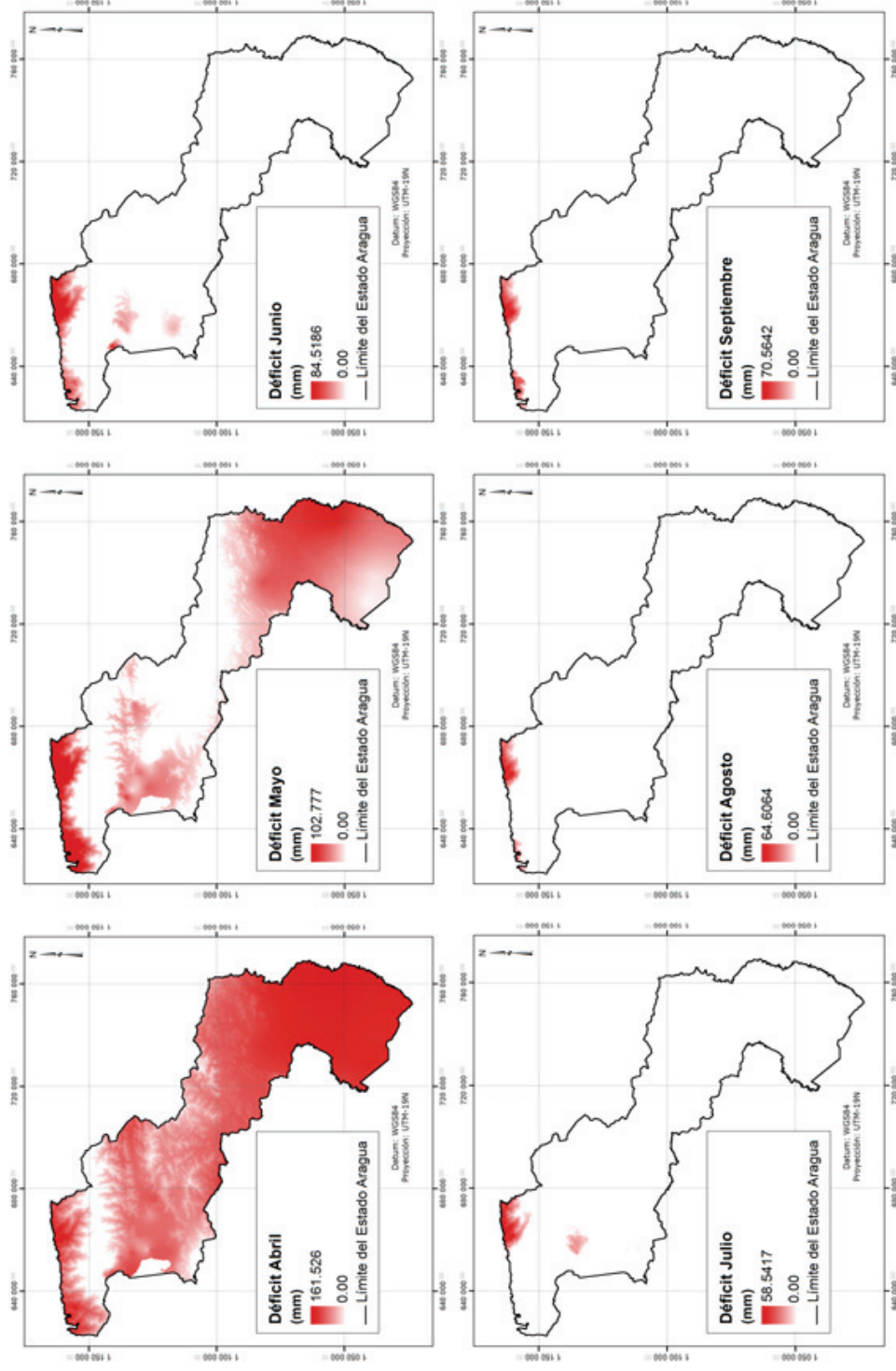
	Mes					
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun
Coef. PRE	-0.9601	-0.7726	-1.6749	-0.3479	-0.0221	-0.1121
Coef. TEM	16.2820	17.8077	23.9536	21.2230	21.5943	7.5074
Coef. DEM	0.0529	0.0563	0.0928	0.0717	0.0888	0.0077
Constante	-225.0756	-263.8534	-394.2646	-360.6390	-425.2954	-30.2535
r ² (%)	82.2478	79.9553	79.6098	72.6369	77.6908	71.3480
r ² ajust.	79.8271	77.2220	76.8293	68.9056	74.6487	67.4409
p-valor	2.0E-08	7.0E-08	9.0E-08	2.0E-06	2.0E-07	4.0E-06

	Mes						Año
	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	
Coef. PRE	-0.1272	-0.1275	-0.0479	-0.0677	-0.0441	-0.4014	-0.0527
Coef. TEM	6.8647	10.2030	7.4803	12.2146	12.3002	13.3617	212.8292
Coef. DEM	0.0018	0.0248	0.0113	0.0375	0.0320	0.0320	0.7382
Constante	-4.5204	-98.2478	-43.4131	-171.6355	-178.5170	-172.6060	-3595.5404
r ² (%)	64.3074	66.1929	63.2967	75.0271	79.2097	84.4250	79.5629
r ² ajust.	59.4402	61.5829	58.2917	71.6217	76.3746	82.3011	76.7761
p-valor	4.0E-05	2.0E-05	5.0E-05	8.0E-07	1.0E-07	5.0E-09	9.0E-08

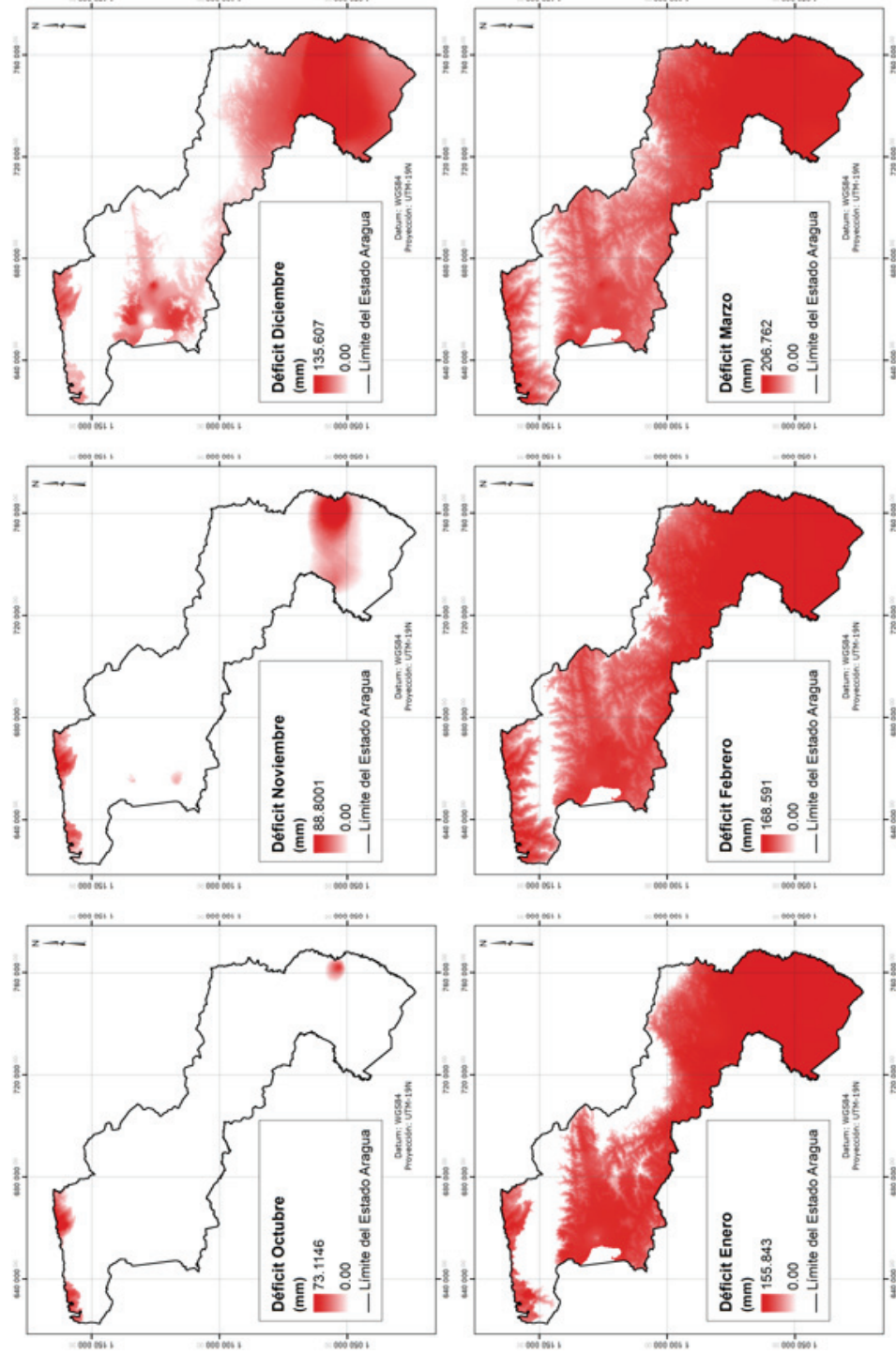
La Ecuación de regresión para la variable Evaporación es:

$$EVA_{mes} = (Coef. PRE_{mes}) * PRE_{mes} + (Coef. TEM_{mes}) * TEM_{mes} + (Coef. DEM_{mes}) * DEM + Constante \quad (69)$$

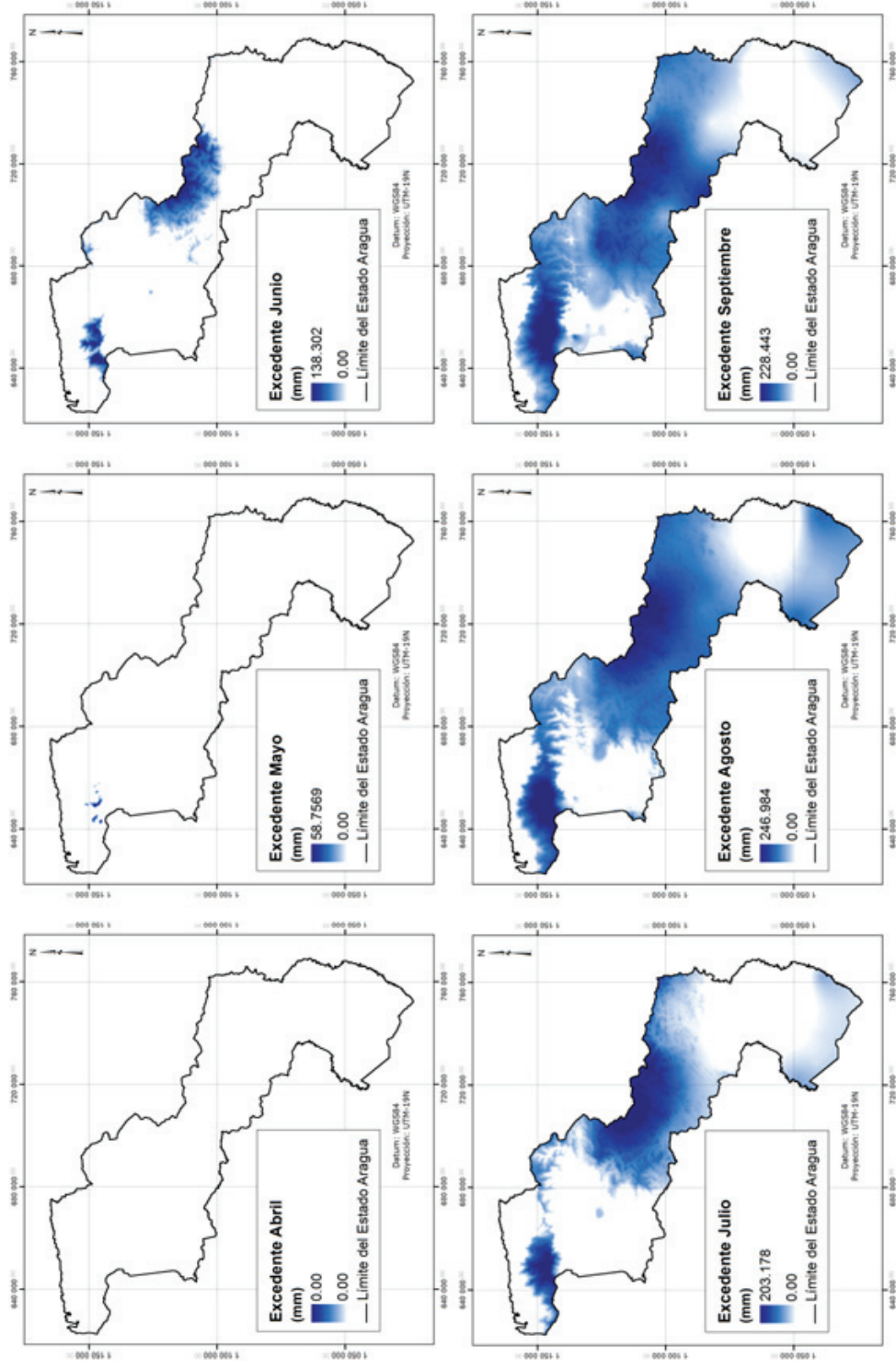
APÉNDICE 10. Déficits promedios mensuales de humedad del suelo.



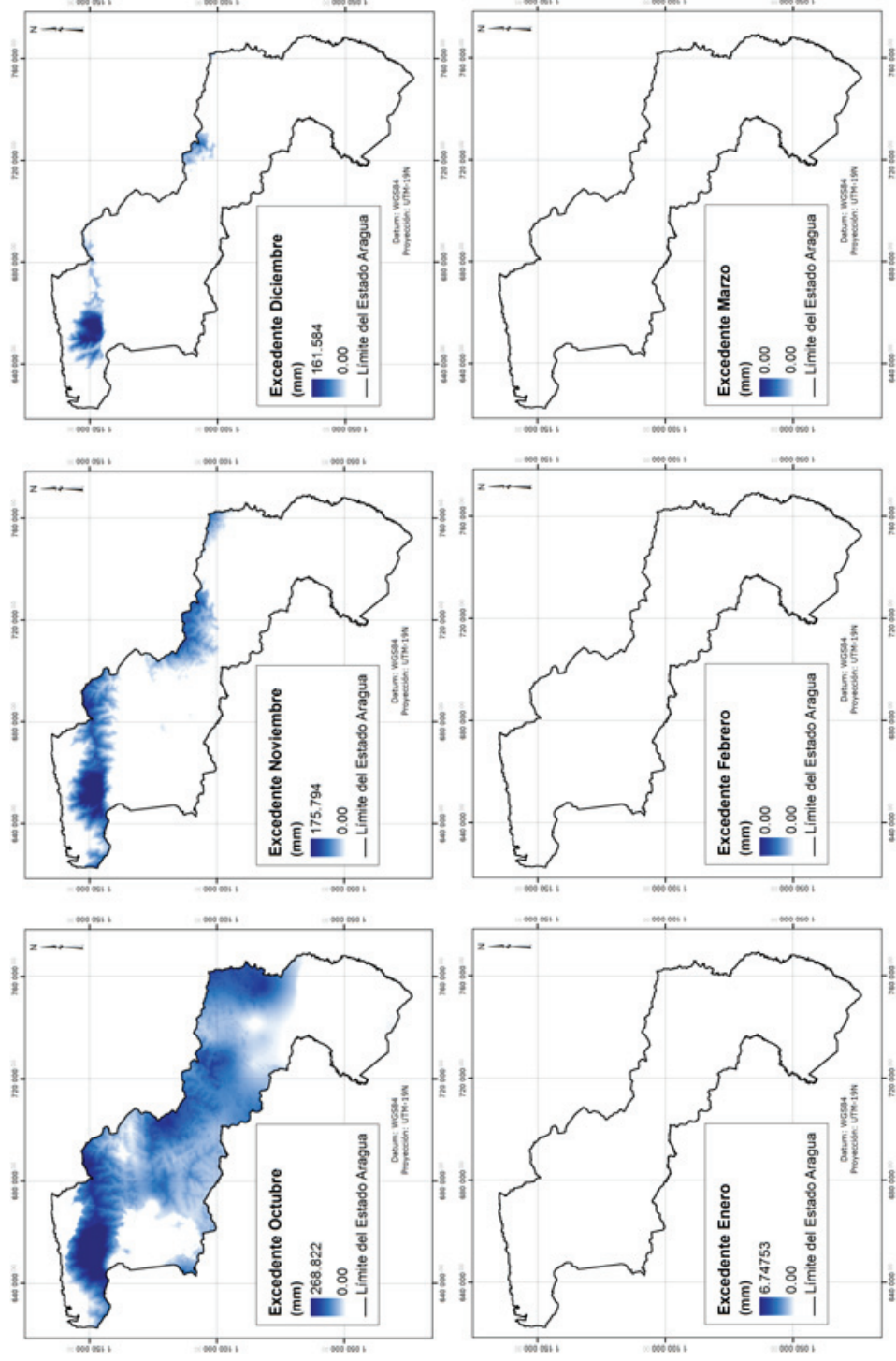
... Apéndice 10. Continuación.



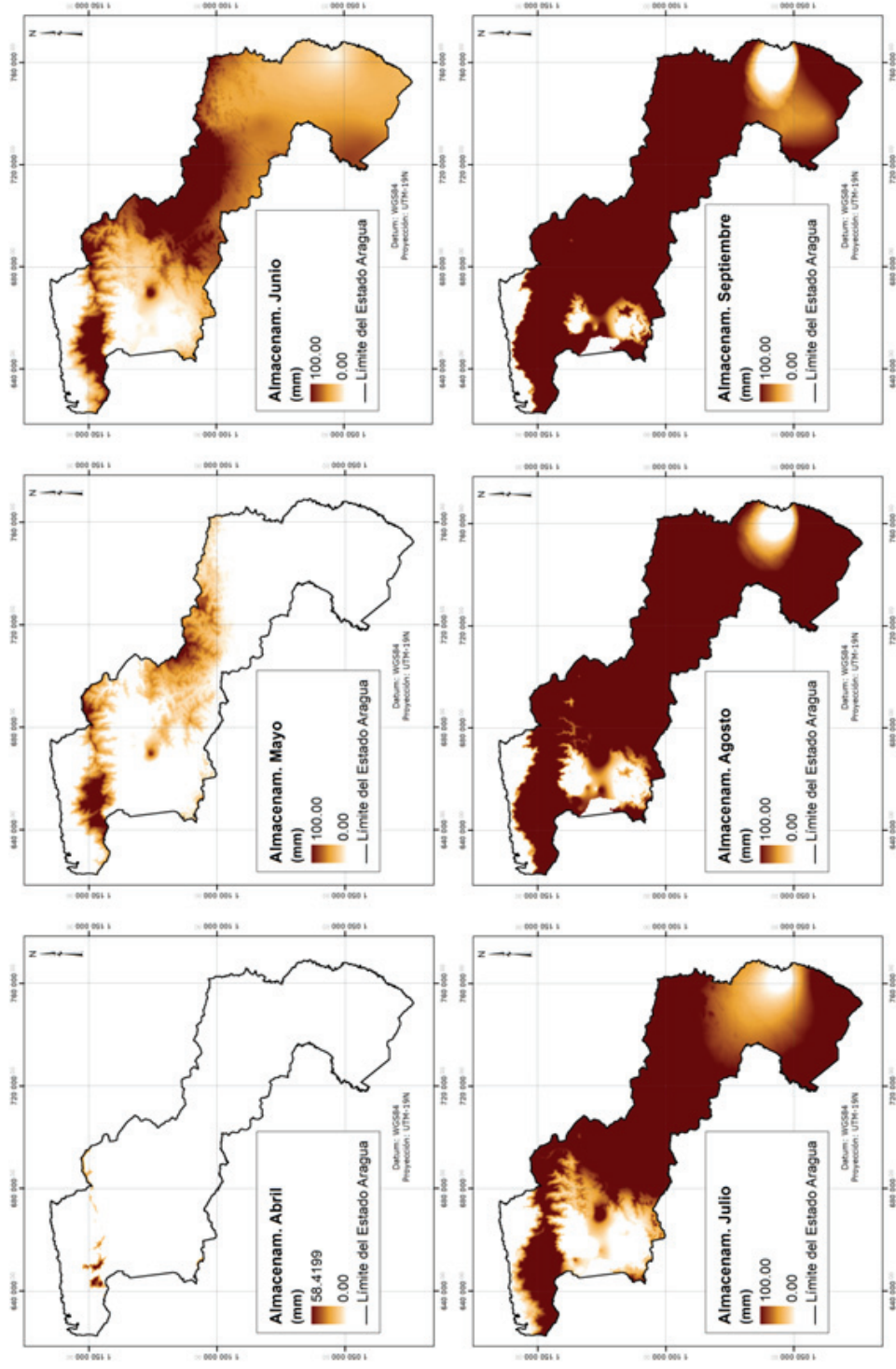
APÉNDICE 11. Excedentes promedios mensuales de humedad del suelo.



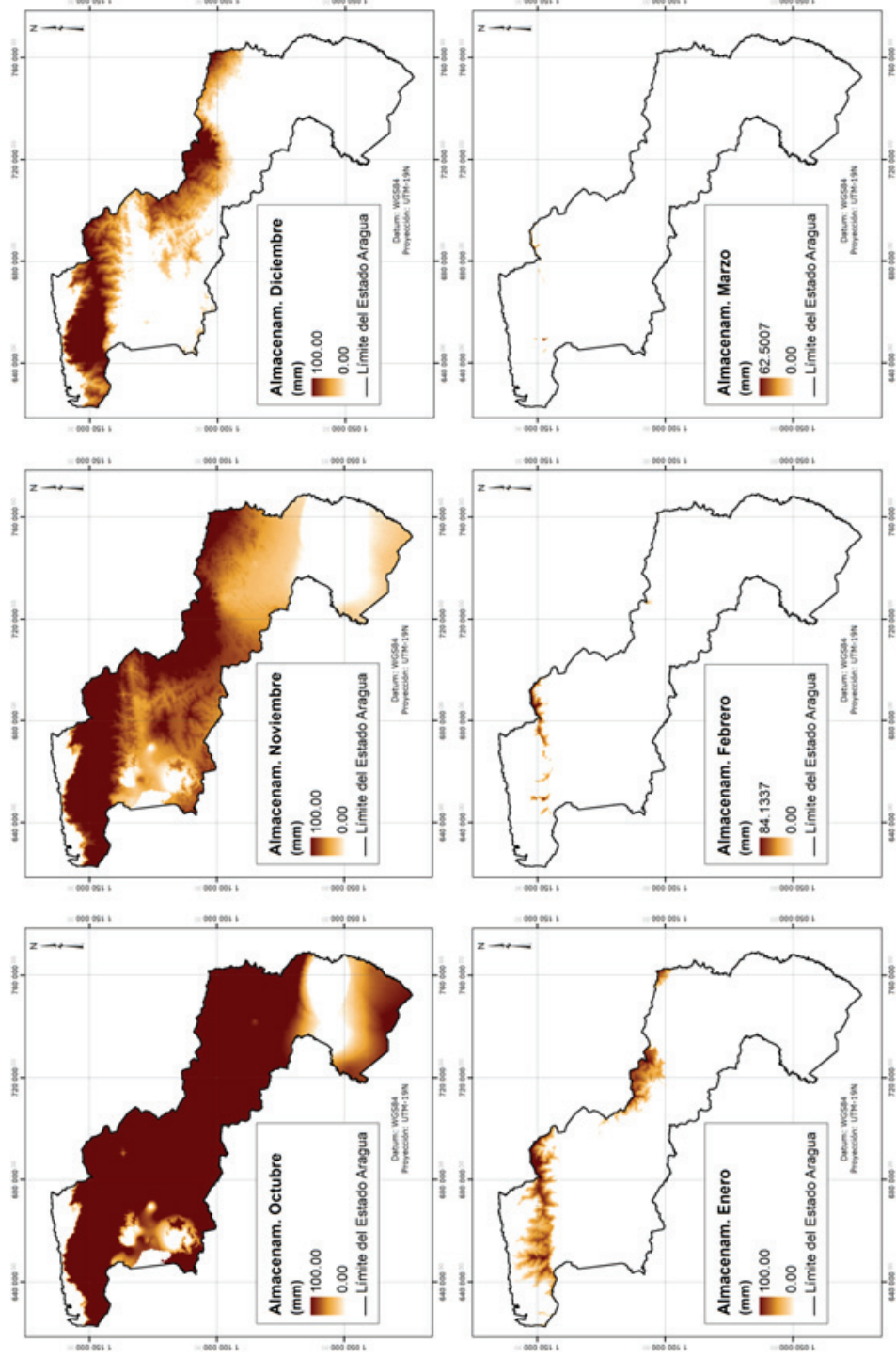
... Apéndice 11. Continuación.



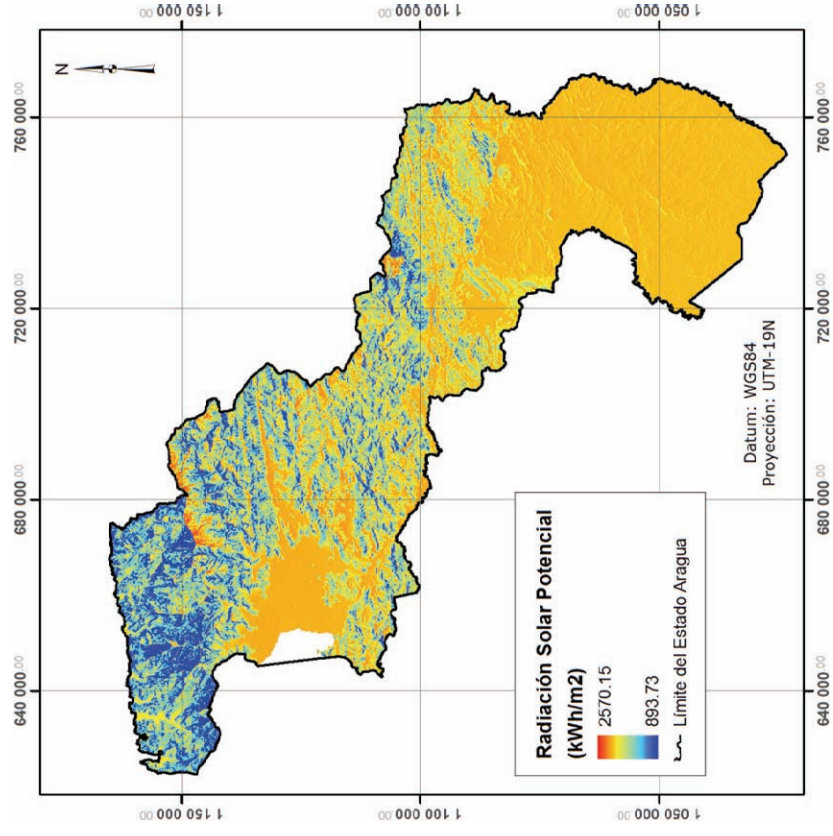
APÉNDICE 12. Almacenamientos promedios mensuales de humedad del suelo.



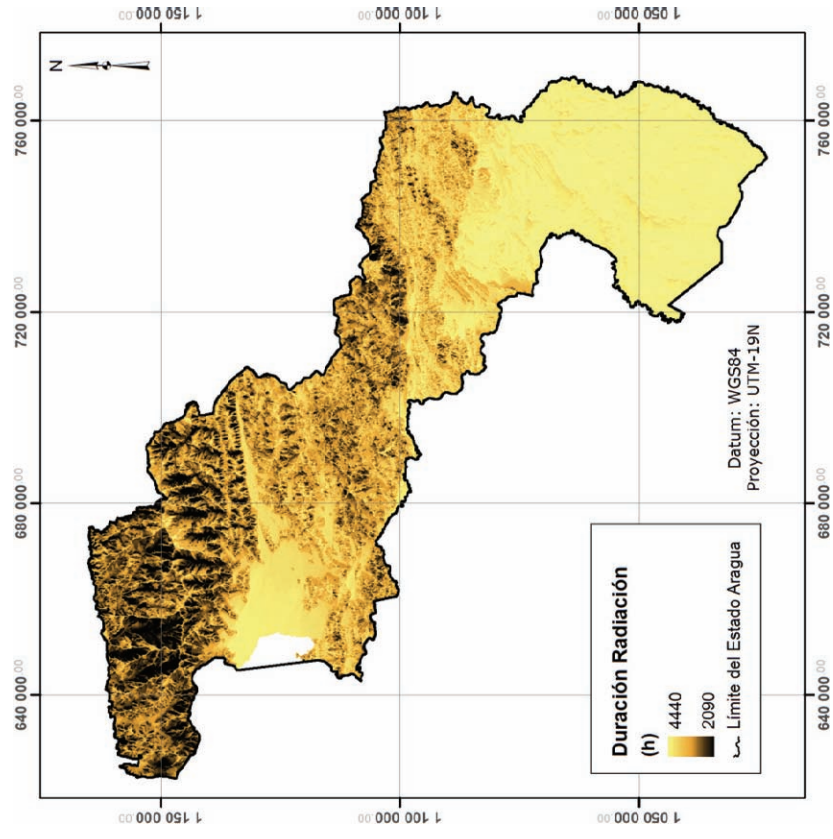
... Apéndice 12. Continuación.



APÉNDICE 13. Variables geomorfológicas topo-climatológicas.

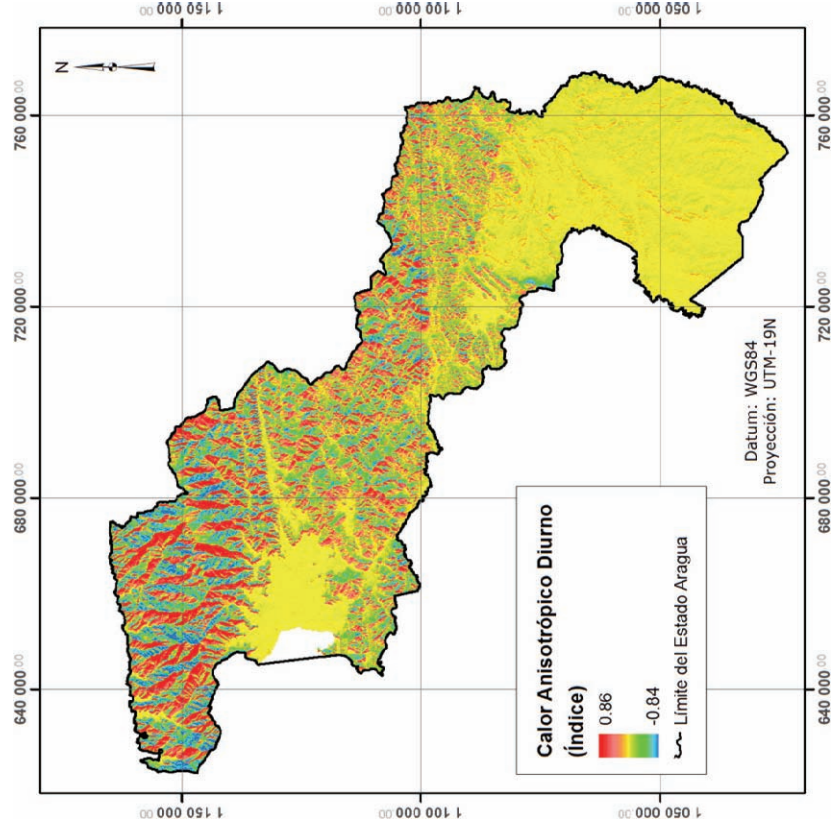


Radiación Solar Potencial (kWh/m²).

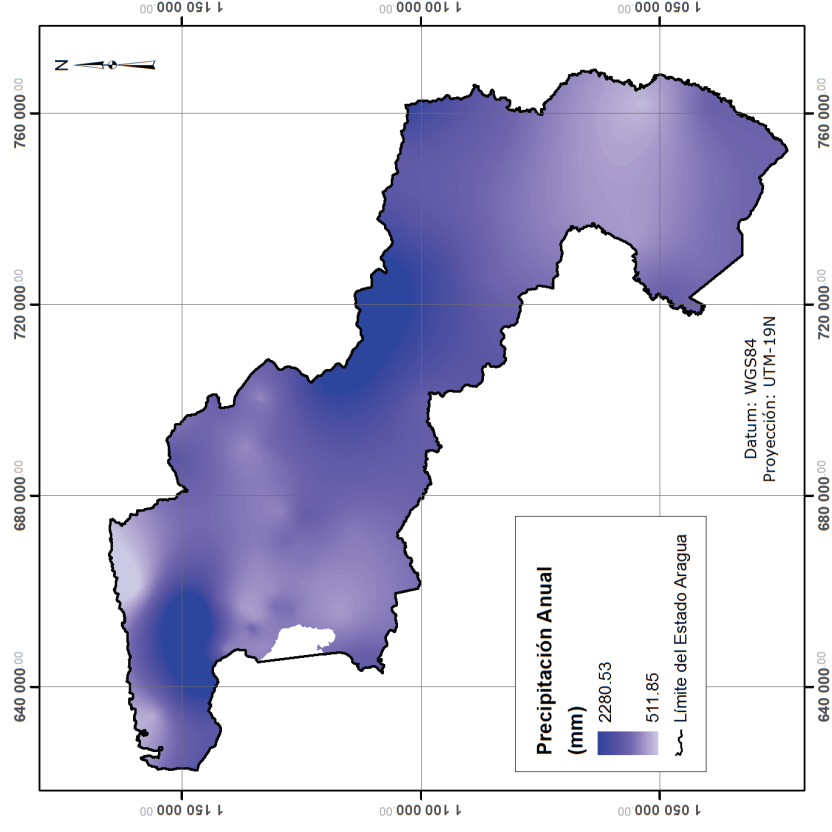


Duración Anual de la Radiación Solar Potencial (h/año).

... Apéndice 13. Continuación.

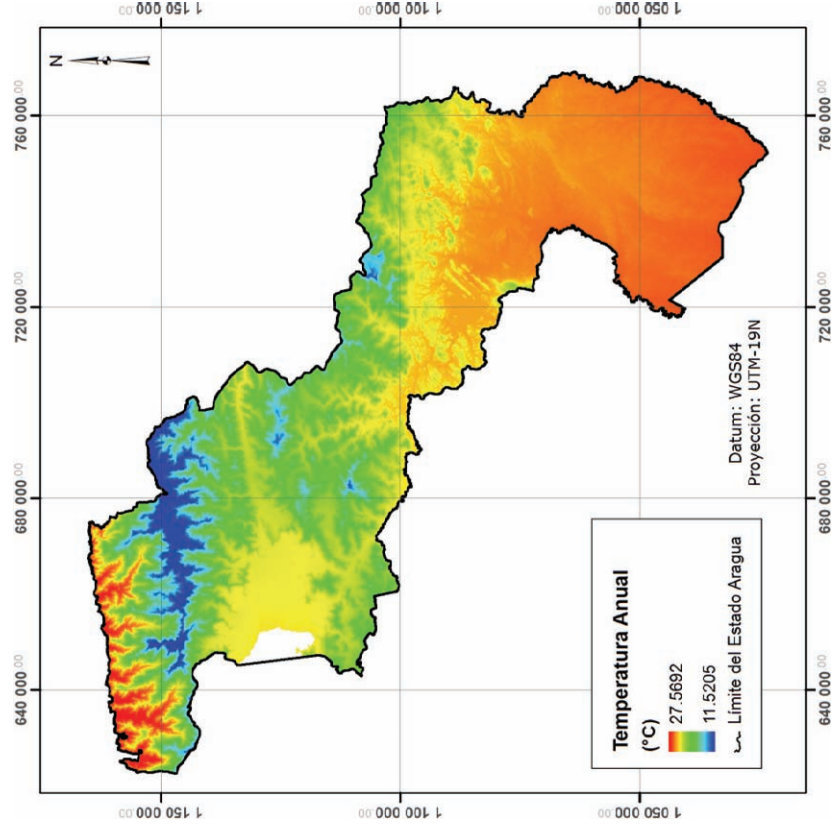


Calor Anisotrópico Diurno.

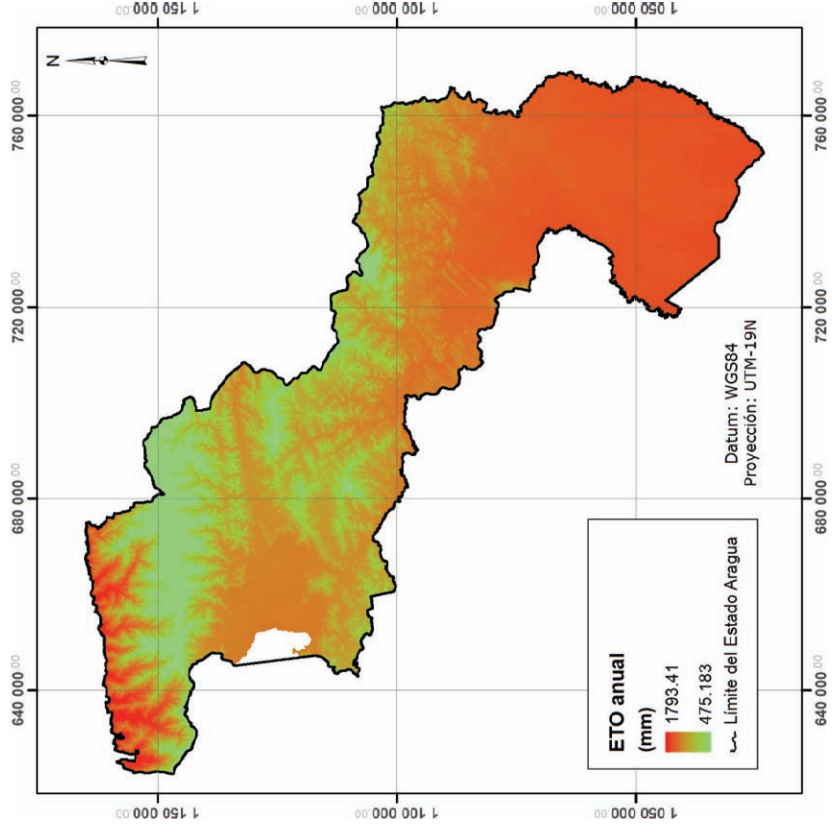


Precipitación Anual (mm).

... Apéndice 13. Continuación.

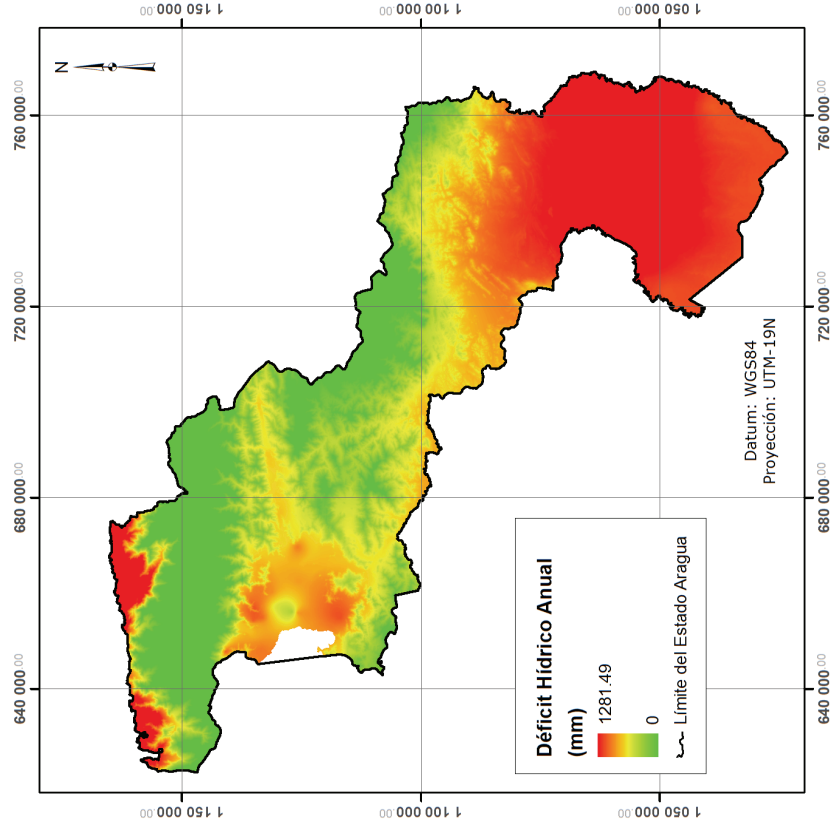


Temperatura Promedio Anual (°C).

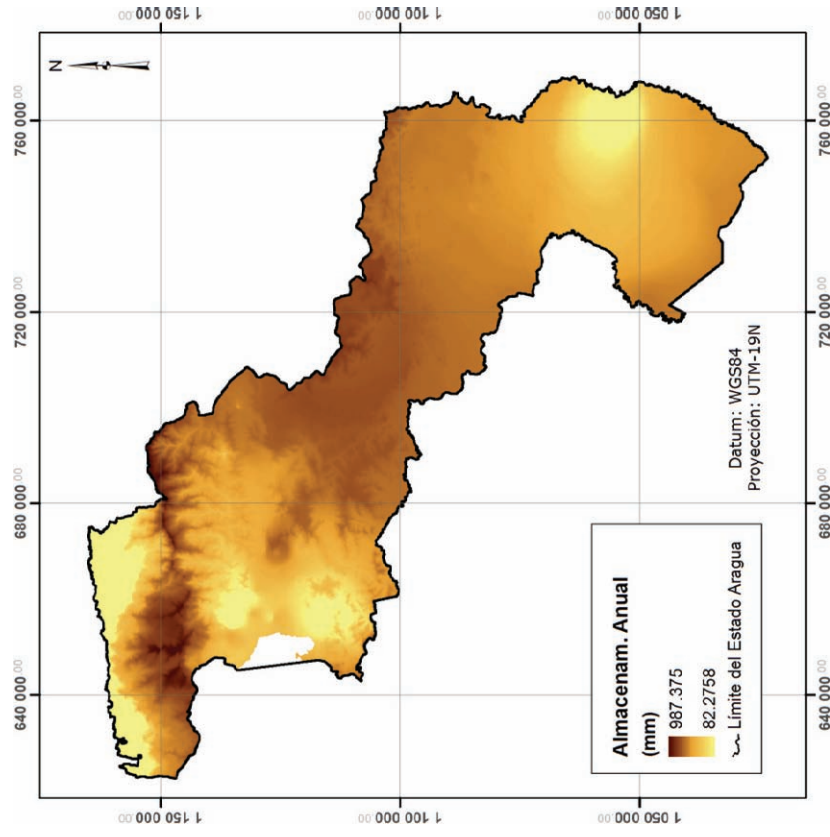


Evapotranspiración Promedio Anual (mm).

... Apéndice 13. Continuación.



Déficit Promedio Anual de Humedad del Suelo (mm).



Almacenamiento Promedio Anual de Humedad del Suelo (mm).

APÉNDICE 14. Matriz de correlación de las variables geomorfométricas evaluadas.

	DEM	PEND	CURV	CURH	CONV	FRACT	FONV	ACU	LONF	LONP	TWI	SPI
DEM	1.0000	0.6266	0.0522	0.0272	0.0740	0.5390	-0.5122	0.1262	0.3081	0.2241	-0.6023	0.2493
PEND	0.6266	1.0000	0.0024	0.0217	0.0867	0.9531	-0.6247	0.0635	0.3497	0.2051	-0.7833	0.2801
CURV	0.0522	0.0024	1.0000	0.2350	0.1849	-0.0017	-0.0168	-0.0708	-0.0690	-0.1010	-0.0816	-0.0726
CURH	0.0272	0.0217	0.2350	1.0000	0.2913	0.0144	-0.0299	-0.2079	-0.0446	-0.2219	-0.0989	-0.2288
CONV	0.0740	0.0867	0.1849	0.2913	1.0000	0.0567	-0.1488	-0.1942	-0.0787	-0.2061	-0.2170	-0.1191
FRACT	0.5390	0.9531	-0.0017	0.0144	0.0567	1.0000	-0.4575	0.0275	0.2786	0.1449	-0.6205	0.2451
FONV	-0.5122	-0.6247	-0.0168	-0.0299	-0.1488	-0.4575	1.0000	-0.1202	-0.3593	-0.2463	0.8113	-0.2048
ACU	0.1262	0.0635	-0.0708	-0.2079	-0.1942	0.0275	-0.1202	1.0000	0.3047	0.5733	-0.0393	0.8414
LONF	0.3081	0.3497	-0.0690	-0.0446	-0.0787	0.2786	-0.3593	0.3047	1.0000	0.4121	-0.3065	0.3205
LONP	0.2241	0.2051	-0.1010	-0.2219	-0.2061	0.1449	-0.2463	0.5733	0.4121	1.0000	-0.1641	0.5364
TWI	-0.6023	-0.7833	-0.0816	-0.0989	-0.2170	-0.6205	0.8113	-0.0393	-0.3065	-0.1641	1.0000	-0.1665
SPI	0.2493	0.2801	-0.0726	-0.2288	-0.1191	0.2451	-0.2048	0.8414	0.3205	0.5364	-0.1665	1.0000
STI	0.5727	0.8372	-0.0753	-0.1687	-0.0527	0.7884	-0.5175	0.3951	0.4509	0.4789	-0.5913	0.6646
BALN	-0.0713	-0.1681	-0.3885	-0.4268	-0.2949	-0.1953	0.0256	0.3543	0.1158	0.3241	0.1640	0.2929
RAD	-0.3932	-0.8450	0.0403	0.0146	-0.0222	-0.8674	0.4217	-0.0638	-0.3269	-0.1699	0.5470	-0.2577
CALD	0.0145	0.0277	0.0026	0.0005	0.0009	0.0331	-0.0075	-0.0171	0.0017	0.0043	-0.0110	-0.0104
PRE	0.4046	0.3782	0.0116	0.0124	0.0222	0.3070	-0.3591	0.0681	0.1986	0.1278	-0.3878	0.1267
DEF	-0.8852	-0.6547	-0.0342	-0.0225	-0.0590	-0.5501	0.5578	-0.1453	-0.3809	-0.2496	0.6287	-0.2639
EXC	0.5682	0.4382	0.0294	0.0199	0.0410	0.3683	-0.3993	0.0640	0.1803	0.1306	-0.4459	0.1396
NDVI	0.4772	0.4215	-0.0269	-0.0359	-0.0232	0.3754	-0.3195	0.1736	0.4108	0.2576	-0.3442	0.2600
ORI	0.0303	0.0667	0.0032	0.0024	0.0810	0.0467	-0.1054	0.0040	0.0567	0.0426	-0.1073	0.0024
IBM	0.0658	0.0309	0.5013	0.5645	0.4517	0.0315	-0.0193	-0.2374	-0.1069	-0.3127	-0.1429	-0.2197
FORM	0.0071	-0.0169	0.1941	0.2893	0.4842	-0.0054	0.0438	-0.2021	-0.1456	-0.2497	-0.0176	-0.1465
DURAD	-0.5306	-0.7987	0.0919	0.0688	0.0475	-0.7258	0.5944	-0.2217	-0.5176	-0.3343	0.6254	-0.3605
ALM	0.4040	0.1846	0.0232	0.0148	0.0253	0.1322	-0.2124	0.0188	0.0224	0.0547	-0.2356	0.0447
CURG	0.0585	0.0190	0.6073	0.6840	0.4269	0.0166	-0.0204	-0.2348	-0.1022	-0.2957	-0.1349	-0.2331
ALTA	0.2384	0.2371	-0.1176	-0.1532	-0.2422	0.2114	-0.2009	0.4348	0.4998	0.4798	-0.0788	0.4583
PENDA	0.5968	0.8718	-0.0760	-0.0157	-0.0346	0.7877	-0.6531	0.1972	0.4817	0.3434	-0.7083	0.3281
ORIA	0.0196	0.0077	-0.0015	0.0007	0.0056	0.0043	-0.0113	0.0189	0.0104	-0.0004	-0.0175	0.0204
DISNR	-0.2815	-0.3190	0.0038	-0.0066	0.0030	-0.2358	0.3486	-0.0982	-0.2368	-0.1541	0.2849	-0.1253
DISVR	0.7124	0.6179	0.1240	0.0837	0.1443	0.5700	-0.4212	-0.0104	0.1377	0.0787	-0.5860	0.1233
ANCHF	-0.0063	-0.0060	0.0075	-0.0044	0.0076	-0.0032	0.0200	0.0229	-0.0274	-0.0307	0.0248	0.0277
TOPCR	-0.4288	-0.5029	-0.0047	-0.0141	0.0950	-0.3720	0.5883	-0.1309	-0.3218	-0.2323	0.5148	-0.1732
MPI	0.5627	0.8191	-0.1421	-0.1192	-0.0947	0.7285	-0.6516	0.2533	0.5341	0.3875	-0.6631	0.3892

... Apéndice 14. Continuación.

	STI	BALN	RAD	CALD	PRE	DEF	EXC	NDVI	ORI	IBM	FORM	DURAD
DEM	0.5727	-0.0713	-0.3932	0.0145	0.4046	-0.8852	0.5682	0.4772	0.0303	0.0658	0.0071	-0.5306
PEND	0.8372	-0.1681	-0.8450	0.0277	0.3782	-0.6547	0.4382	0.4215	0.0667	0.0309	-0.0169	-0.7987
CURV	-0.0753	-0.3885	0.0403	0.0026	0.0116	-0.0342	0.0294	-0.0269	0.0032	0.5013	0.1941	0.0919
CURH	-0.1687	-0.4268	0.0146	0.0005	0.0124	-0.0225	0.0199	-0.0359	0.0024	0.5645	0.2893	0.0688
CONV	-0.0527	-0.2949	-0.0222	0.0009	0.0222	-0.0590	0.0410	-0.0232	0.0810	0.4517	0.4842	0.0475
FRACT	0.7884	-0.1953	-0.8674	0.0331	0.3070	-0.5501	0.3683	0.3754	0.0467	0.0315	-0.0054	-0.7258
FONV	-0.5175	0.0256	0.4217	-0.0075	-0.3591	0.5578	-0.3993	-0.3195	-0.1054	-0.0193	0.0438	0.5944
ACU	0.3951	0.3543	-0.0638	-0.0171	0.0681	-0.1453	0.0640	0.1736	0.0040	-0.2374	-0.2021	-0.2217
LONF	0.4509	0.1158	-0.3269	0.0017	0.1986	-0.3809	0.1803	0.4108	0.0567	-0.1069	-0.1456	-0.5176
LONP	0.4789	0.3241	-0.1699	0.0043	0.1278	-0.2496	0.1306	0.2576	0.0426	-0.3127	-0.2497	-0.3343
TWI	-0.5913	0.1640	0.5470	-0.0110	-0.3878	0.6287	-0.4459	-0.3442	-0.1073	-0.1429	-0.0176	0.6254
SPI	0.6646	0.2929	-0.2577	-0.0104	0.1267	-0.2639	0.1396	0.2600	0.0024	-0.2197	-0.1465	-0.3605
STI	1.0000	0.0916	-0.7302	0.0214	0.3208	-0.5977	0.3691	0.4625	0.0455	-0.1826	-0.1330	-0.7631
BALN	0.0916	1.0000	0.1038	-0.0003	-0.0013	0.0391	-0.0301	0.0585	0.0012	-0.6427	-0.3392	-0.0947
RAD	-0.7302	0.1038	1.0000	0.0684	-0.2694	0.4478	-0.2912	-0.3947	-0.0390	0.0216	0.0326	0.7441
CALD	0.0214	-0.0003	0.0684	1.0000	0.0282	-0.0199	0.0300	-0.0139	0.5486	-0.0008	-0.0012	0.0114
PRE	0.3208	-0.0013	-0.2694	0.0282	1.0000	-0.7033	0.9381	0.3005	0.0309	-0.0032	-0.0190	-0.3814
DEF	-0.5977	0.0391	0.4478	-0.0199	-0.7033	1.0000	-0.7247	-0.5030	-0.0391	-0.0352	0.0100	0.6265
EXC	0.3691	-0.0301	-0.2912	0.0300	0.9381	-0.7247	1.0000	0.3579	0.0303	0.0234	-0.0080	-0.3866
NDVI	0.4625	0.0585	-0.3947	-0.0139	0.3005	-0.5030	0.3579	1.0000	0.0580	-0.0517	-0.1063	-0.4989
ORI	0.0455	0.0012	-0.0390	0.5486	0.0309	-0.0391	0.0303	0.0580	1.0000	-0.0039	-0.1081	-0.0446
IBM	-0.1826	-0.6427	0.0216	-0.0008	-0.0032	-0.0352	0.0234	-0.0517	-0.0039	1.0000	0.6021	0.1428
FORM	-0.1330	-0.3392	0.0326	-0.0012	-0.0190	0.0100	-0.0080	-0.1063	-0.1081	0.6021	1.0000	0.1200
DURAD	-0.7631	-0.0947	0.7441	0.0114	-0.3814	0.6265	-0.3866	-0.4989	-0.0446	0.1428	0.1200	1.0000
ALM	0.1398	-0.0243	-0.0447	0.0249	0.7390	-0.5761	0.6967	0.0492	0.0292	0.0168	-0.0004	-0.1058
CURG	-0.1955	-0.6582	0.0359	0.0001	0.0010	-0.0324	0.0245	-0.0543	-0.0014	0.9444	0.5198	0.1431
ALTA	0.4740	0.2942	-0.2651	0.0120	0.1745	-0.3100	0.1519	0.3414	-0.0131	-0.2395	-0.1623	-0.4758
PENDA	0.7908	0.0450	-0.7398	0.0303	0.4271	-0.6765	0.4534	0.4585	0.0564	-0.1068	-0.1047	-0.8676
ORIA	0.0123	-0.0016	-0.0092	-0.5619	-0.0019	-0.0086	0.0071	0.0117	-0.7331	0.0039	0.0047	-0.0156
DISNR	-0.2794	-0.0181	0.2315	-0.0020	-0.2720	0.3596	-0.2598	-0.1857	-0.0115	0.0217	0.0238	0.3784
DISVR	0.4868	-0.2015	-0.4259	0.0248	0.2506	-0.6180	0.3856	0.3814	0.0364	0.1785	0.0741	-0.3917
ANCHF	0.0271	-0.0182	0.0073	0.0103	-0.0051	0.0067	-0.0064	-0.0336	-0.0610	0.0011	0.0917	-0.0179
TOPCR	-0.4245	-0.0018	0.3465	-0.0069	-0.3538	0.5063	-0.3625	-0.2455	-0.0147	0.0349	0.0659	0.5273
MPI	0.8034	0.1639	-0.7258	0.0160	0.4307	-0.6609	0.4414	0.4946	0.0567	-0.2299	-0.1791	-0.9216

... Apéndice 14. Continuación.

	ALM	CURG	ALTA	PENDA	ORIA	DISNR	DISVR	ANCHF	TOPCR	MPI
DEM	0.4040	0.0585	0.2384	0.5968	0.0196	-0.2815	0.7124	-0.0063	-0.4288	0.5627
PEND	0.1846	0.0190	0.2371	0.8718	0.0077	-0.3190	0.6179	-0.0060	-0.5029	0.8191
CURV	0.0232	0.6073	-0.1176	-0.0760	-0.0015	0.0038	0.1240	0.0075	-0.0047	-0.1421
CURH	0.0148	0.6840	-0.1532	-0.0157	0.0007	-0.0066	0.0837	-0.0044	-0.0141	-0.1192
CONV	0.0253	0.4269	-0.2422	-0.0346	0.0056	0.0030	0.1443	0.0076	0.0950	-0.0947
FRACT	0.1322	0.0166	0.2114	0.7877	0.0043	-0.2358	0.5700	-0.0032	-0.3720	0.7285
FONV	-0.2124	-0.0204	-0.2009	-0.6531	-0.0113	0.3486	-0.4212	0.0200	0.5883	-0.6516
ACU	0.0188	-0.2348	0.4348	0.1972	0.0189	-0.0982	-0.0104	0.0229	-0.1309	0.2533
LONF	0.0224	-0.1022	0.4998	0.4817	0.0104	-0.2368	0.1377	-0.0274	-0.3218	0.5341
LONP	0.0547	-0.2957	0.4798	0.3434	-0.0004	-0.1541	0.0787	-0.0307	-0.2323	0.3875
TWI	-0.2356	-0.1349	-0.0788	-0.7083	-0.0175	0.2849	-0.5860	0.0248	0.5148	-0.6631
SPI	0.0447	-0.2331	0.4583	0.3281	0.0204	-0.1253	0.1233	0.0277	-0.1732	0.3892
STI	0.1398	-0.1955	0.4740	0.7908	0.0123	-0.2794	0.4868	0.0271	-0.4245	0.8034
BALN	-0.0243	-0.6582	0.2942	0.0450	-0.0016	-0.0181	-0.2015	-0.0182	-0.0018	0.1639
RAD	-0.0447	0.0359	-0.2651	-0.7398	-0.0092	0.2315	-0.4259	0.0073	0.3465	-0.7258
CALD	0.0249	0.0001	0.0120	0.0303	-0.5619	-0.0020	0.0248	0.0103	-0.0069	0.0160
PRE	0.7390	0.0010	0.1745	0.4271	-0.0019	-0.2720	0.2506	-0.0051	-0.3538	0.4307
DEF	-0.5761	-0.0324	-0.3100	-0.6765	-0.0086	0.3596	-0.6180	0.0067	0.5063	-0.6609
EXC	0.6967	0.0245	0.1519	0.4534	0.0071	-0.2598	0.3856	-0.0064	-0.3625	0.4414
NDVI	0.0492	-0.0543	0.3414	0.4585	0.0117	-0.1857	0.3814	-0.0336	-0.2455	0.4946
ORI	0.0292	-0.0014	-0.0131	0.0564	-0.7331	-0.0115	0.0364	-0.0610	-0.0147	0.0567
IBM	0.0168	0.9444	-0.2395	-0.1068	0.0039	0.0217	0.1785	0.0011	0.0349	-0.2299
FORM	-0.0004	0.5198	-0.1623	-0.1047	0.0047	0.0238	0.0741	0.0917	0.0659	-0.1791
DURAD	-0.1058	0.1431	-0.4758	-0.8676	-0.0156	0.3784	-0.3917	-0.0179	0.5273	-0.9216
ALM	1.0000	0.0194	0.0183	0.1841	-0.0132	-0.1490	0.1864	-0.0033	-0.2105	0.1733
CURG	0.0194	1.0000	-0.2337	-0.0994	0.0023	0.0154	0.1670	-0.0002	0.0201	-0.2287
ALTA	0.0183	-0.2337	1.0000	0.5142	-0.0061	-0.2354	0.0574	-0.0005	-0.2817	0.5103
PENDA	0.1841	-0.0994	0.5142	1.0000	0.0000	-0.4033	0.5019	-0.0067	-0.5901	0.9198
ORIA	-0.0132	0.0023	-0.0061	0.0000	1.0000	-0.0079	0.0134	-0.0088	0.0035	0.0131
DISNR	-0.1490	0.0154	-0.2354	-0.4033	-0.0079	1.0000	-0.1041	-0.0007	0.5290	-0.4145
DISVR	0.1864	0.1670	0.0574	0.5019	0.0134	-0.1041	1.0000	-0.0083	-0.3019	0.3712
ANCHF	-0.0033	-0.0002	-0.0005	-0.0067	-0.0088	-0.0007	-0.0083	1.0000	-0.0064	-0.0099
TOPCR	-0.2105	0.0201	-0.2817	-0.5901	0.0035	0.5290	-0.3019	-0.0064	1.0000	-0.5791
MPI	0.1733	-0.2287	0.5103	0.9198	0.0131	-0.4145	0.3712	-0.0099	-0.5791	1.0000

APÉNDICE 15. Coeficientes del modelo logístico para cada clase de Capacidad de Uso de la Tierra por variable geomorfológica.

Clases de Capacidad	β_0	β_1 (DEM)	β_2 (PEND)	β_3 (FONV)	β_4 (TWI)	β_5 (SPI)	β_6 (STI)	β_7 (EXC)	β_8 (DURAD)	β_9 (ALM)	β_{10} (PENDA)
G_12(X)	-1.9171	0.9629	-0.0364	0.2663	0.2195	-5.0269	-0.0081	-7.8515	0.0028	-0.46	0.0353
G_20(X)	-80.3508	-5.3441	-0.0647	0.2953	0.4036	-58.824	0.0726	-19.5421	0.001	0.15	0.0397
G_30(X)	-71.9932	-6.2944	-0.0131	0.3548	0.1957	-4.1937	-0.0203	-15.13	0.0017	-1.1461	0.055
G_36(X)	-20.4292	-6.6342	-0.1198	-0.2554	0.0334	-15.4944	-0.0541	-34.6709	-0.0026	39.9095	0.0082
G_40(X)	-270.577	-14.0953	-0.2586	0.157	-0.1688	-14.8808	0.1039	-16.041	0.0073	-5.0415	-0.0056
G_43(X)	9782.8548	-51.4332	0.0444	0.2676	0.3561	-495.5776	1.5009	-36.0668	0.0117	2.2981	-0.2531
G_46(X)	10865.109	-74.9055	0.8621	-0.3094	1.5426	-410.4596	1.0234	-96.4076	0.0317	-7.2397	-0.4399
G_50(X)	915.2147	6.673	0.3092	0.3924	0.7527	-48.6573	0.1655	-50.4877	0.0085	41.3389	0.047
G_55(X)	1349.6647	-147.0337	-0.1084	-0.0091	-0.4487	-484.2424	1.5686	-43.7177	0.0032	-1.2344	-0.2954
G_60(X)	-68.1369	-4.8085	-0.056	0.1467	0.1025	0.5996	-0.017	-1.4497	-0.0002	-4.4878	0.0239
G_62(X)	35.4078	-1.8521	0.0038	-0.1206	0.1951	-8.8141	-0.0326	0.9526	0.0009	28.2089	-0.0002
G_67(X)	137.1929	0.8136	0.0671	-0.1612	-0.1017	-4.5854	0.0138	5.1801	-0.0004	-13.0747	-0.004
G_75(X)	-126.1605	4.7774	-0.1272	-0.0051	-0.9727	-28.0815	0.0496	-13.6947	-0.0022	55.024	-0.0956
G_76(X)	99.8182	6.7567	0.0312	0.422	-0.1543	-1.2501	0.0089	-7.3523	-0.0003	-14.9423	0.0229
G_80(X)	-44.5241	-0.7691	-0.0938	0.4077	-0.4135	-25.2538	0.1075	0.8056	-0.0001	9.0483	0.1013

... Apéndice 15. Continuación.

Clases de Capacidad	β_{11} (DISNR)	β_{12} (TOPCR)	β_{13} (MPI)	β_{14} (CONV)	β_{15} (LONF)	β_{16} (BALN)	β_{17} (FRACT)	β_{18} (ACU)	β_{19} (NDVI)
G_12(X)	-1.0038	0.1126	-7.5714	0.0163	1.1158	-0.0018	-7.4015	0.0069	1.7298
G_20(X)	-0.0082	0.4133	1.6673	0.0097	0.1587	-0.0056	34.878	-0.0331	1.9887
G_30(X)	-0.1141	0.1448	-11.5023	0.0116	-0.3305	0.0005	32.7519	0.0236	1.5431
G_36(X)	-1.1617	0.0178	-3.4959	0.0095	0.1684	-0.0309	6.0812	0.0356	3.7215
G_40(X)	-0.0697	0.4278	14.1893	0.0072	0.7156	-0.006	126.1112	0.039	-2.802
G_43(X)	-0.3494	0.3695	53.1389	0.012	0.4597	-0.0213	-4914.885	0.266	-7.7549
G_46(X)	0.1	0.4399	-114.6931	0.0032	0.5863	0.1098	-5507.457	0.263	-1.622
G_50(X)	-0.0995	-0.1095	-17.7603	0.012	-1.6872	-0.011	-496.6156	0.105	-1.1156
G_55(X)	0.0046	0.777	-149.3723	-0.0021	0.018	0.2364	-659.092	0.1858	-2.912
G_60(X)	-0.1635	0.3029	-3.3999	0.0086	0.4353	-0.0064	35.6305	-0.0124	1.2501
G_62(X)	-1.9862	-0.0535	7.2327	0.0089	0.1986	-0.0171	-31.948	0.037	-0.3565
G_67(X)	-0.3064	0.4914	-6.5277	-0.0059	0.4054	-0.0006	-66.702	0.0324	6.1083
G_75(X)	-3.1027	1.468	24.2927	-0.0254	-0.2351	-0.0071	50.2485	0.0342	-3.0955
G_76(X)	-0.636	0.6295	10.2702	0.0143	0.2256	-0.0026	-49.5409	0.0082	-1.1779
G_80(X)	0.1631	-0.4071	-12.6864	0.0072	-2.4002	-0.0029	18.5273	0.0618	1.2757

APÉNDICE 16. Influencia de cada variable geomorfológica en cada clase de Capacidad de Uso de la Tierra (Razón de Odds).

logit(Y)	Odds $\beta_k = \text{EXP}(\beta_k)$									
	(DEM)	(PEND)	(FONV)	(TWI)	(SPI)	(STI)	(EXC)	(DURAD)	(ALM)	(PENDA)
G_12(X)	2.62	0.96	1.31	1.25	0.01	0.99	0.00	1.00	0.63	1.04
G_20(X)	0.00	0.94	1.34	1.50	0.00	1.08	0.00	1.00	1.16	1.04
G_30(X)	0.00	0.99	1.43	1.22	0.02	0.98	0.00	1.00	0.32	1.06
G_36(X)	0.00	0.89	0.77	1.03	0.00	0.95	0.00	1.00	2.15E+17	1.01
G_40(X)	0.00	0.77	1.17	0.84	0.00	1.11	0.00	1.01	0.01	0.99
G_43(X)	0.00	1.05	1.31	1.43	0.00	4.49	0.00	1.01	9.96	0.78
G_46(X)	0.00	2.37	0.73	2.08E+448	0.00	2.78	0.00	1.03	0.00	0.64
G_50(X)	790.76	1.36	1.48	2.12	0.00	1.18	0.00	1.01	8.98E+17	1.05
G_55(X)	0.00	0.90	0.99	0.64	0.00	4.80	0.00	1.00	0.29	0.74
G_60(X)	0.01	0.95	1.16	1.11	1.82	0.98	0.23	1.00	0.01	1.02
G_62(X)	0.16	1.00	0.89	1.22	0.00	0.97	2.59	1.00	1.78E+12	1.00
G_67(X)	2.26	1.07	0.85	0.90	0.01	1.01	177.70	1.00	0.00	1.00
G_75(X)	118.80	0.88	0.99	0.38	0.00	1.05	0.00	1.00	7.88E+23	0.91
G_76(X)	859.80	1.03	1.53	0.86	0.29	1.01	0.00	1.00	0.00	1.02
G_80(X)	0.46	0.91	1.50	0.66	0.00	1.11	2.24	1.00	8504.07	1.11

... Apéndice 16. Continuación.

logit(Y)	Odds $\beta_k = \text{EXP}(\beta_k)$								
	(DISNR)	(TOPCR)	(MPI)	(CONV)	(LONF)	(BALN)	(FRACT)	(ACU)	(NDVI)
G_12(X)	0.37	1.12	0.00	1.02	3.05	1.00	0.00	1.01	5.64
G_20(X)	0.99	1.51	5.30	1.01	1.17	0.99	1.40E+15	0.97	7.31
G_30(X)	0.89	1.16	0.00	1.01	0.72	1.00	1.67E+14	1.02	4.68
G_36(X)	0.31	1.02	0.03	1.01	1.18	0.97	4.38E+02	1.04	41.33
G_40(X)	0.93	1.53	1.45E+06	1.01	2.05	0.99	5.88E+54	1.04	0.06
G_43(X)	0.71	1.45	1.20E+23	1.01	1.58	0.98	0.00	1.30	0.00
G_46(X)	1.11	1.55	0.00	1.00	1.80	1.12	0.00	1.30	0.20
G_50(X)	0.91	0.90	0.00	1.01	0.19	0.99	0.00	1.11	0.33
G_55(X)	1.00	2.17	0.00	1.00	1.02	1.27	0.00	1.20	0.05
G_60(X)	0.85	1.35	0.03	1.01	1.55	0.99	2.98E+15	0.99	3.49
G_62(X)	0.14	0.95	1383.95	1.01	1.22	0.98	0.00	1.04	0.70
G_67(X)	0.74	1.63	0.00	0.99	1.50	1.00	0.00	1.03	449.57
G_75(X)	0.04	4.34	3.55E+10	0.97	0.79	0.99	6.65E+21	1.03	0.05
G_76(X)	0.53	1.88	28859.66	1.01	1.25	1.00	0.00	1.01	0.31
G_80(X)	1.18	0.67	0.00	1.01	0.09	1.00	1.11E+08	1.06	3.58

APÉNDICE 18. Escenarios de simulación de valoración tributaria en fincas del Estado Aragua.

- Parcela 303. Sector La Peña. Uso Maíz (Con Vocación de Uso).

	Escenarios de RPpc									
	Experimental	PIDA	100% RNI	80% RNI	79% RNI	60% RNI	40% RNI	20% RNI	10% RNI	1% RNI
RNIpmv (t/ha)	75.52	75.52	75.52	75.52	75.52	75.52	75.52	75.52	75.52	75.52
RNIpc (t/ha)	75.52	75.52	75.52	75.52	75.52	75.52	75.52	75.52	75.52	75.52
RMIpmv (t/ha)	85.81	85.81	85.81	85.81	85.81	85.81	85.81	85.81	85.81	85.81
RMIpc (t/ha)	85.81	85.81	85.81	85.81	85.81	85.81	85.81	85.81	85.81	85.81
RPpc (t/ha)	119.66	85.81	75.52	68.65	67.79	51.48	34.32	17.16	8.58	0.86
PNp (BsF/kg) (año 2007)	0.76	0.76	0.76	0.76	0.76	0.76	0.76	0.76	0.76	0.76
PR (BsF)	14 493 764.85	10 393 335.12	9 147 811.27	8 314 668.10	8 210 734.74	6 236 001.07	4 157 334.05	2 078 667.02	1 039 333.51	103 933.35
PI (BsF)	9 147 811.27	9 147 811.27	9 147 811.27	9 147 811.27	9 147 811.27	9 147 811.27	9 147 811.27	9 147 811.27	9 147 811.27	9 147 811.27
BI (BsF)	18 295 622.54	18 295 622.54	18 295 622.54	18 295 622.54	18 295 622.54	18 295 622.54	18 295 622.54	18 295 622.54	18 295 622.54	18 295 622.54
%BI	200.00	200.00	200.00	200.00	200.00	200.00	200.00	200.00	200.00	200.00
Alicuota (Tarifa II) (%)	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00
Impuesto (BsF)	2 195 474.70	2 195 474.70	2 195 474.70	2 195 474.70	2 195 474.70	2 195 474.70	2 195 474.70	2 195 474.70	2 195 474.70	2 195 474.70
%imp/PR	15.15	21.12	24.00	26.40	26.74	35.21	52.81	105.62	211.24	2 112.39

... Apéndice 18. Continuación.

- Parcela 3. Sector Tocarón. Uso Caña de Azúcar (Sin Vocación de Uso).

	Experimental	PIDA	Escenarios de RPpc							
			100% RNI	80% RNI	79% RNI	60% RNI	40% RNI	20% RNI	10% RNI	1% RNI
RNIpmv (t/ha)	3.47	3.47	3.47	3.47	3.47	3.47	3.47	3.47	3.47	3.47
RNIpc (t/ha)	3.47	3.47	3.47	3.47	3.47	3.47	3.47	3.47	3.47	3.47
RMIpmv (t/ha)	3.53	3.53	3.53	3.53	3.53	3.53	3.53	3.53	3.53	3.53
RMIpc (t/ha)	3.53	3.53	3.53	3.53	3.53	3.53	3.53	3.53	3.53	3.53
RPpc (t/ha)	6.21	3.53	3.47	2.78	2.74	2.08	1.39	0.69	0.35	0.03
PNp (BsF/kg) (año 2007)	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
PR (BsF)	162 971.35	92 792.55	91 190.41	72 952.33	72 040.43	54 714.25	36 476.17	18 238.08	9 119.04	911.90
PI (BsF)	91 190.41	91 190.41	91 190.41	91 190.41	91 190.41	91 190.41	91 190.41	91 190.41	91 190.41	91 190.41
BI	-71 780.93	-1 602.14	0.00	18 238.08	19 149.99	36 476.17	54 714.25	72 952.33	82 071.37	90 278.51
%BI	-78.72	-1.76	0.00	20.00	21.00	40.00	60.00	80.00	90.00	99.00
Alcuota (Tarifa II)	0.00	0.00	0.00	0.00	2.00	2.00	5.00	12.00	12.00	12.00
Impuesto	0.00	0.00	0.00	0.00	383.00	729.52	2 735.71	8 754.28	9 848.56	10 833.42
%Imp/PR	0.00	0.00	0.00	0.00	0.53	1.33	7.50	48.00	108.00	1 188.00

