# Análisis satelital de la urbanización en la cuenca del embalse San Roque (1972-2020) y su relación con aspectos geomorfológicos y geográficos

Por Daniel Castellano Francucci

Presentado ante la Facultad de Matemática, Astronomía, Física y Computación y el Instituto de Altos Estudios Espaciales Mario Gulich para optar al título de la

### MAESTRÍA EN APLICACIONES DE INFORMACIÓN ESPACIAL

#### UNIVERSIDAD NACIONAL DE CORDOBA

Diciembre de 2021

©IG - CONAE/UNC 2021 ©FAMAF - UNC 2021

Director de tesis: Dr. Luccini, Eduardo. Co-Directora de tesis: Mg. García Ferreyra, María Fernanda.



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0. Internacional. http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/

## Resumen

Los entornos urbanos afectan los procesos ecológicos, el clima, los flujos de materiales y las transformaciones del terreno, un estudio detallado del desarrollo urbano constituye un aporte para la comprensión de muchos fenómenos relacionados al bienestar público y ambiental. En este trabajo se analiza el desarrollo del paisa je urbano en la cuenca del embalse San Roque, principal cuerpo de agua del departamento Punilla en la provincia de Córdoba, Argentina. En él se utilizan imágenes satelitales de distintas plataformas Landsat para caracterizar la evolución de la superficie edificada y huella urbana entre los años 1972 y 2020. Mediante la utilización de técnicas de clasificación temática, procesamiento digital de imágenes y análisis geomorfológico del terreno se determinó la evolución de la urbanización y su fragmentación. Se estimó un crecimiento total de la huella urbana mayor al 450 %, con una tasa promedio de crecimiento cercana a los 4 km<sup>2</sup>/año, concentrándose principalmente en la cercanía de cuerpos de agua y el embalse. Asimismo, se explora también el grado de correlación entre la edificación y características del terreno como elevación, cercanía a fuentes de agua, geoformas locales y otras, demostrando diferentes niveles de asociación según la disponibilidad de espacios edificables. Durante el progreso de la tesis se desarrollaron algoritmos computacionales, y procedimientos analíticos, los cuales fueron agrupados en un único software que se espera facilite la realización de múltiples estudios a futuro.

#### Palabras clave

Embalse San Roque; Cuenca hidrográfica; Urbanización y uso del suelo; Teledetección satelital; Landsat; Evolución temporal; Geomorfología.

#### Abstract

Urban environments affect ecological processes, climate, material flows and land transformations, a detailed study of urban development constitutes a contribution to the understanding of many phenomena related to public and environmental well-being. This work analyzes the development of the urban landscape in the basin of the San Roque reservoir, the main body of water in the Punilla department in the province of Córdoba, Argentina. In it, satellite images from different Landsat platforms are used to characterize the evolution of the built surface and urban footprint between 1972 and 2020. Through the use of thematic classification techniques, digital image processing and geomorphological analysis of the terrain, the evolution of urbanization and its fragmentation was determined. The total growth of the urban footprint was estimated in about  $450\,\%$ , with an average growth rate close to  $4\,\mathrm{km^2/year}$ , concentrated mainly on the proximity water courses and the lake reservoir. Also, it studies the degree of correlation between the building and land characteristics, such as elevation, proximity to water sources, local geoforms and others, showing different levels of association according to the avai-

lability of building spaces. During the progress of the thesis, computational algorithms and analytical procedures were developed, which were grouped into a single software that is expected to facilitate the performance of multiple studies in the future.

### Keywords

San Roque reservoir; Watershed; Urbanization and land use; Satellite remote sensing; Landsat; Temporal evolution; Geomorphology.

### Dedicatoria

Dedico esta obra a mis abuelos y padres, mujeres y hombres laboriosos que con el ejemplo inculcaron en mi persona el valor del trabajo honesto, la perseverancia y la paciencia necesarias para no abandonar las tareas que se complican, mas redoblar esfuerzos para conseguirlas.

También la dedico con empatía a las decenas de millones de familiares, de aquellas personas que se ausentaron definitivamente durante la pandemia de Covid-19.

A mi padre Jorge, a quién no pudimos despedir como hubiéramos querido.

# Agradecimientos

Durante el desarrollo de esta tesis y el período previo de entrenamiento técnico, me he encontrado con profesionales y estudiantes que, buscando respuestas a sus propias inquietudes contribuyeron en mayor o menor medida a responder las mías. Profesionales del ámbito privado, estatal y académico a quienes hago extensivo mi sincero agradecimiento porque de una forma directa o indirecta han contribuido a esta obra.

Merece sin embargo que haga mención a los numerosos profesores del instituto de Altos Estudios Espaciales Mario Gulich, FAMAF y FCEFyN que contribuyeron con su invaluable experiencia en áreas diversas, con mucha pedagogía y paciencia. A los directivos del Ceprocor del gobierno de Córdoba por facilitar el tiempo, recursos económicos y apoyo necesario para esta empresa. Al Mg. Mario Ravera y Lic. Alejandro Germanier, por su apoyo, numerosas gestiones realizadas y por iniciar con sus preguntas e inquietudes científicas el objeto de este estudio. A la Dra. Julieta Nóvile, por su guía durante el período de la tutoría de investigación en Cicterra. A mis directores de tesis Dr. Eduardo Luccini y Mg. Fernanda García por su dedicación, guía y acompañamiento constante.

Al Sr. Luis Castillo, por compartir amablemente su tiempo, conocimiento histórico y material bibliográfico.

Por último agradezco profundamente a mi familia por la paciencia y silencio en las largas horas de estudio, desarrollo de algoritmos y redacción del informe, en las que estuve ausente.

Comuna San Roque, diciembre de 2021.

# Índice general

Re	esumen	1
De	edicatoria	3
Αį	gradecimientos	3
Ín	adice de figuras	6
Ín	adice de tablas	11
Al	breviaturas y siglas	16
1.	Introducción	17
	1.1. Hipótesis	21
	1.2. Objetivos Generales	21
	1.3. Objetivos Específicos	21
2.	Materiales y métodos	23
	2.1. Área de estudio	23
	2.2. Teledetección	25
	2.3. Escenas e imágenes satelitales	32
	2.4. Fuentes de datos	34
	2.5. Hardware y programas de computación empleados	37
	2.6. Procesamiento de los datos satelitales	37
	2.7. Coberturas, uso de suelo y detección de cambios	47
	2.8. Fragmentación urbana	52
3.	Análisis de datos	<b>54</b>
	3.1. Pretratamiento de las escenas Landsat	54

	3.2.	Implementación y optimización del procedimiento de clasificación	62
	3.3.	Análisis de la fragmentación urbana	84
	3.4.	Generación de datos auxiliares	87
4.	Res	ultados	90
	4.1.	Evolución de la superficie edificada de la cuenca	90
	4.2.	Segmentación urbana	91
	4.3.	Relación entre la urbanización y el número de habitantes	99
	4.4.	Crecimiento de la edificación y la huella urbana discriminado por localidad	103
	4.5.	Características geográficas y geomorfológicas de la superficie edificada	111
5.	Con	aclusiones	<b>12</b> 6
R	efere	ncias	131
$\mathbf{A}_{\mathbf{l}}$	pénd	ice A: Orígenes del embalse San Roque.	140
${f A}_{f J}$	pénd	ice B: Crecimiento poblacional, urbanización y medio ambiente	143
$\mathbf{A}_{\mathbf{l}}$	pénd	ice C: Mapas de la cuenca	145
$\mathbf{A}_{\mathbf{j}}$	pénd	ice D: Construcción de las máscaras de clasificación	155
${f A}_{f l}$	pénd	ice E: Procedimiento de segmentación para elementos urbanos	157
$\mathbf{A}_{\mathbf{l}}$		ice F: Comparación de los resultados generados por algoritmos de segmentación napas de diferente resolución espacial	n 161
${f A}_{f J}$		ice G: Análisis poblacional, ajustes lineales y rectas utilizadas en la estimación número de habitantes	n 163
$\mathbf{A}_{\mathbf{l}}$	pénd	ice H: Estimación de errores: modelo de elevaciones y modelo de pendientes	166
$\mathbf{A}_{\mathbf{j}}$	pénd	ice I: Análisis de crecimiento. Segmentación por radios urbanos	169
${f A}_{f J}$	-	ice J: Histogramas de frecuencia relativa. Variables en píxeles edificados refe s a píxeles disponibles.	- 171
Αı	sénd	ice K: Software Ardema	174

# Índice de figuras

Figura 1.	Imagen satelital del embalse San Roque. Afloramiento algar	18
Figura 2.	Crecimiento urbano (1986 vs 2019)	19
Figura 3.	Locación del área de estudio	23
Figura 4. 1960. (	Crecimiento poblacional de las localidades registradas en el censo nacional de Cuenca del San Roque.	25
Figura 5.	Elementos de un sistema de teledetección	28
Figura 6.	Firmas espectrales de clases exploratorias para diferentes sensores	29
Figura 7. ópticos	Espectro de radiación electromagnética - Zona de trabajo de los instrumentos s y radares	31
Figura 8. TM	Representación gráfica (RGB) de las matrices de datos espectrales, sensor Landsat-	33
Figura 9.	Composiciones de color para la visualización de características del terreno	34
Figura 10.	Bandas de los sensores Landsat y transmisividad atmosférica	35
Figura 11.	Modelo de iluminación. Ángulos intervinientes	43
Figura 12.	Modelo de iluminación para la zona de estudio	44
Figura 13. emplea	Precisión global de distintos índices de edificación propuestos según el sensor ado	50
Figura 14.	Proceso de acondicionamiento de las escenas Landsat	55
Figura 15.	Proceso de generación del modelo de iluminación	58
Figura 16.	Imágenes con y sin corrección del sombreado topográfico	59
Figura 17.	Perfil de varianza del modelo de iluminación	61
Figura 18.	Valores de NDVI de las regiones evaluadas	63
Figura 19.	Segmentación de la cobertura vegetal de la cuenca	64
Figura 20.	Regiones de muestreo para estadística de clases	65
Figura 21	Regiones de muestreo. Zona edificada	66

	clases temáticas	67
Figura 23. MSS.	Clasificación exploratoria inicial. Bandas originales escenas Landsat 5, sensor	68
Figura 24. 2019.	Clasificaciones sobre bandas originales: 1:MSS-1988, 2:TM-2005, 3:OLI-TIRS-	72
Figura 25. TIRS-	Clasificaciones sobre espacio espectral extendido: 4:MSS-1988, 5:TM-2005, 6:OLI-2019	73
Figura 26.	Resultados clasificación sectorizada	74
Figura 27. vales $\epsilon$	Mapas de cobertura. Comparación de resultados obtenidos entre imágenes esti- e invernales sensor MSS	76
Figura 28. vales $\epsilon$	Mapas de cobertura. Comparación de resultados obtenidos entre imágenes esti- e invernales sensor OLI-TIRS	77
Figura 29.	Muestreo aleatorio y evaluación de la representatividad de clasificación	80
Figura 30.	Mapas intervinientes en la segmentación urbana	85
Figura 31.	Proceso de segmentación urbana	86
Figura 32.	Evolución de la superficie edificada de la cuenca en $\mathrm{km}^2.$	91
Figura 33.	Evolución elementos urbanos	92
Figura 34.	Evolución espacios verdes urbanos	92
Figura 35.	Evolución de la relación de huella urbana	92
Figura 36.	Evolución de la huella urbana	93
Figura 37.	Mapas: evolución de los elementos de segmentación urbana	94
Figura 38.	Mapa: elementos de segmentación urbana para 1972	95
Figura 39.	Mapa: elementos de segmentación urbana para 1995	96
Figura 40.	Mapa: elementos de segmentación urbana para 2020	97
Figura 41.	Mapa: evolución de la huella urbana en la cuenca del San Roque: 1972 a 2020.	98
Figura 42.	Evolución del número de habitantes de la cuenca	100
Figura 43.	Mapa: radios urbanos, localidades de la cuenca	101
Figura 44.	Evolución de las densidades poblacionales de la cuenca	102
Figura 45.	Evolución urbana: Bialet Massé, Cabalango, Casa Grande	103
Figura 46.	Evolución urbana: Cosquín, Cuesta Blanca, Estancia Vieja	103
Figura 47.	Evolución urbana:Huerta Grande, La Cumbre, La Falda	104
Figura 48.	Evolución urbana:Mayu Sumaj, San Antonio de Arredondo, San Roque	104
Figura 49.	Evolución urbana: Santa María, Tala Huasi, Tanti	104

Figura 50.	Evolución urbana: Valle Hermoso, Villa Carlos Paz, Villa Giardino	105
Figura 51. Lago.	Evolución urbana: Villa Icho Cruz, Villa Parque Síquiman, Villa Santa Cruz del	105
Figura 52. edifica	Gráfico de dispersión. Valores medios para las velocidades de crecimiento de la ción vs relaciones de huella urbana	106
Figura 53.	Comparación de resultados vs superficie edificada publicada por IDECOR	108
Figura 54.	Comparación de resultados huellas urbanas tesis vs IDECOR	109
Figura 55.	Distribución total de la elevación $H$ en m.s.n.m	112
Figura 56.	Distribución total de la elevación local normalizada $Hl_n$	112
Figura 57.	Distribución total de la elevación normalizada $H_n$	113
Figura 58.	Distribución total de la pendiente $P$ en grados	114
Figura 59.	Distribución total de la distancia a la mitad de la pendiente $dmP$	114
Figura 60.	Distribución total de la orientación $O.$	115
Figura 61.	Distribución total de las geoformas locales $CM$	115
Figura 62. $dRD \epsilon$	Distribución total para la distancia mínima a elementos de la red de drenaje en metros	116
Figura 63.	Distribución total para la distancia mínima a rutas principales $dRV$ en metros.	116
Figura 64.	Distribución de la densidad urbana $dU$	117
Figura 65. Bhatta	Distribuciones relativas a espacios disponibles para elevación $H$ . Distancia de acharyya porcentual y distribuciones.	119
Figura 66. $Hl_n$ . I	Distribuciones relativas a espacios disponibles para elevación local normalizada Distancia de Bhattacharyya porcentual y distribuciones	119
Figura 67. Distan	Distribuciones relativas a espacios disponibles para elevación normalizada $H_n$ .  acia de Bhattacharyya porcentual y distribuciones	119
_	Distribuciones relativas a espacios disponibles para pendiente $P$ . Distancia de acharyya porcentual y distribuciones.	120
Figura 69. pendie	Distribuciones relativas a espacios disponibles para distancias a la mitad de la ente $dmP$ . Distancia de Bhattacharyya porcentual y distribuciones	120
Figura 70. de Bha	Distribuciones relativas a espacios disponibles para la orientación O. Distancia attacharyya porcentual y distribuciones	120
Figura 71. de Bha	Distribuciones relativas a espacios disponibles para las geoformas $CM$ . Distancia attacharyya porcentual y distribuciones	121
9	Distribuciones relativas a espacios disponibles para la distancia mínima a eles de la red de drenaje $dRD$ . Distancia de Bhattacharyya porcentual y distribuciones.	.121
Figura 73. princip	Distribuciones relativas a espacios disponibles para la distancia mínima a rutas pales $dRV$ . Distancia de Bhattacharyya porcentual y distribuciones	122

tancia	Distribuciones relativas a espacios disponibles para la densidad urbana $dU$ . Disde Bhattacharyya porcentual y distribuciones	122
Figura 75.	Densidad urbana $(dU)$ vs elevación $(H)$	123
Figura 76.	Densidad urbana $(dU)$ vs elevación local normalizada $(Hl_n)$	123
Figura 77.	Densidad urbana $(dU)$ vs elevación normalizada $(H_n)$	124
Figura 78.	Densidad urbana $(dU)$ vs pendiente $(P)$	124
Figura 79.	Densidad urbana $(dU)$ vs distancia a la mitad de la pendiente $(dmP)$	124
Figura 80.	Densidad urbana $(dU)$ vs orientación $(O)$	125
Figura 81.	Densidad urbana $(dU)$ vs distancia a la red vial $(dRV)$	125
Figura 82.	Densidad urbana $(dU)$ vs distancia a la red de drenaje $(dRD)$	125
Figura 83.	Reproducción parcial del mapa de la provincia de Córdoba de 1866	141
Figura 84.	Playa San Roque Sud, antes del dique	142
Figura 85.	Entrada a la quebrada San Roque, pre dique	142
Figura 86.	Mapa: modelo de elevaciones de la zona de estudio	145
Figura 87.	Mapa: red de drenaje y cuenca hídrica	146
Figura 88.	Mapa: pendientes de la cuenca	147
Figura 89.	Mapa: orientaciones	148
Figura 90.	Mapa: distancias relativas a la mitad de la pendiente	149
Figura 91.	Mapa: elevaciones normalizadas	150
Figura 92.	Mapa: elevaciones normalizadas por radio urbano	151
Figura 93.	Mapa: geoformas de la cuenca	152
Figura 94.	Mapa: distancias a red de drenaje	153
Figura 95.	Mapa: distancia a red vial primaria	154
Figura 96.	Máscaras de clasificación. Zonas rural y urbana.	156
Figura 97.	Segmentación urbana. Estimación de espacios abiertos capturados	158
Figura 98.	Segmentación urbana. Estimación de espacios rurales abiertos	159
Figura 99.	Segmentación urbana. Estimación de espacios abiertos marginales	159
Figura 100.	Segmentación urbana. Estimación de espacios abiertos exteriores	159
Figura 101.	Segmentación urbana. Estimación de huella urbana	160
Figura 102.	Segmentación urbana. Estimación de huella rural.	160
Figura 103.	Comparación de algoritmos de segmentación urbana	161
0	Regresión lineal ordinaria. Población total de las localidades de la cuenca del oque. En la imagen se utiliza el punto como separador decimal en lugar de la coma.	.164

Figura 105. Distribución del error de muestreo vs pendiente. Parte A	 	 	•	167
Figura 106. Distribución del error de muestreo vs pendiente. Parte B	 	 		167
Figura 107. Construcción de histogramas relativos: A	 	 		172
Figura 108. Construcción de histogramas relativos: B	 	 		173
Figura 109. Ardema: Módulo de corte empaque y calibración	 	 		175
Figura 110. Ardema: Módulo de composición de imágenes	 	 		176
Figura 111. Ardema: Módulo de extracción de características	 	 		177
Figura 112. Ardema: Módulo de estadística	 	 	•	178
Figura 113. Ardema, módulo de reasignación de valores	 	 		179

# Índice de tablas

Tabla 1.	Bandas Landsat y sus características	35
Tabla 2.	Confiabilidad de las clasificaciones. Matriz de confusión	52
Tabla 3.	Índices de fragmentación de las ciudades de Buenos Aires y Montevideo	53
Tabla 4.	Grilla de píxeles, cálculo de gradientes	58
Tabla 5. de est	Desempeño de los métodos de corrección de sombreado topográfico sobre la zona tudio	61
Tabla 6.	Estadística de la respuesta del NDVI	63
Tabla 7.	Separabilidad de las clases (de menor a mayor)	68
Tabla 8.	Optimización de factores de clasificación. Diseño experimental y resultados.	70
Tabla 9.	Esquema de bandas-espacio espectral extendido para el sensor MSS	70
Tabla 10.	Esquema de bandas-espacio espectral extendido para el sensor TM	71
Tabla 11.	Esquema de bandas-espacio espectral extendido para el sensor OLI-TIRS	71
Tabla 12. $\mathrm{km}^2$ .	Matriz de confusión. Clasificaciones invernal vs estival. Sensor MSS. Valores en	76
Tabla 13. en km	Matriz de confusión. Clasificaciones invernal vs estival. Sensor OLI-TIRS. Valores $a^2$	77
Tabla 14.	Matriz de confusión. Clasificaciones invernal vs estival dentro de los radios urba- Sensor MSS. Valores en ${\rm km}^2$	78
Tabla 15.	Matriz de confusión. Clasificaciones invernal vs estival dentro de los radios urba- Sensor OLI-TIRS. Valores en km <sup>2</sup>	78
Tabla 16.	Superficie de los ROIs de entrenamiento clase U en $\mathrm{m}^2$ , sensor MSS	78
Tabla 17.	Efecto del tamaño de ROI urbano en la clasificación de las escenas MSS y OLI-TIRS	78
Tabla 18.	Evaluación de la representatividad de las clasificaciones	80
Tabla 19.	Edificios históricos utilizados como puntos de control de la metodología	82
Tabla 20.	Detección de edificios aislados	83
Tabla 21.	Evolución de la clase <b>U</b> v superficie edificada	90

Tabla 22.	Parámetros resultantes de la segmentación urbana	91
Tabla 23.	Datos censales muestreados y estimados	99
Tabla 24.	Superficies edificadas y densidades de población	102
Tabla 25.	Estadística: velocidad de crecimiento medio de la edificación $(CEd_m)$ y las relade huella urbana media $(RHU_m)$ de las localidades de la cuenca	105
Tabla 26.	Superficies edificadas estimadas: IDECOR 2018 vs Tesis 2020	107
Tabla 27. vs ID	Matriz de confusión y precisiones globales. Píxeles 10x10m, edificados tesis 2020 ECOR 2018. Ed es píxel edificado. No Ed es píxel no edificado. P es precisión.	107
Tabla 28.	Concordancia entre píxeles edificados: tesis 2020 vs IDECOR 2018	108
Tabla 29. se mu	Concordancia de la fragmentación urbana: tesis 2020 vs Idecor 2018. Los valores estran en píxeles. P es precisión	109
Tabla 30.	Huellas urbanas tesis 2020 e IDECOR 2018. Comparación de las superficies ob-	
tenida	AS	109
Tabla 31.	Distribución estadística: elevaciones	112
Tabla 32.	Distribución estadística: elevación local normalizada	113
Tabla 33.	Distribución estadística: elevación normalizada	113
Tabla 34.	Distribución estadística: pendientes	114
Tabla 35.	Distribución estadística: distancia a la mitad de la pendiente	114
Tabla 36.	Distribución estadística: orientaciones	115
Tabla 37.	Distribución estadística: geoformas	115
Tabla 38.	Distribución estadística: distancia a elementos de la red de drenaje	116
Tabla 39.	Distribución estadística: distancia a elementos de la red vial principal	117
Tabla 40.	Distribución estadística: densidad de edificación	117
Tabla 41.	Núcleos de cálculo para la operación de convolución - cálculo de densidad urbana	157
Tabla 42.	Algoritmos de segmentación. Comparación de resultados para distintas resoluses espaciales	162
Tabla 43.	Matriz de confusión. Salida de algoritmos de segmentación urbana	162
Tabla 44.	Habitantes por localidades y por año. Cuenca del San Roque	163
Tabla 45. vincia	Habitantes totales por año. Localidades de estudio, departamento Punilla y prode de Córdoba	164
Tabla 46.	Segmentos de rectas utilizados para interpolar valores dentro de los intervalos les	165
Tabla 47.	Número de habitantes estimados	165
Tabla 48.	Evolución superficie edificada y huella urbana por localidad. Parte A $\dots$	169

Tabla 49. Evolución superficie edificada y huella urbana por localidad. Parte B $\ \ldots \ \ldots \ 170$ 

# Abreviaturas y siglas

A: banda espectral azul.

ACCA: Automated Cloud-Cover Assessmen.

A-V: clases temáticas agua-vegetación.

BASI : índice de prominencia de área construida.

BCI : índice de composición biofísica.BQA : band of quality assurance.

BRBA: relación de bandas de área construida.

BSI: índice de suelo desnudo.

CBI: índice combinacional de edificación

Cca: cuenca hidrográfica.

CEC: módulo de Ardema: corte, compilación, calibración.

CICTERRA: Centro de Investigaciones en Ciencias de la Tierra.

CM: geoformas locales.Co: banda costera L8.

CONAE: Comisión Nacional de Actividades Espaciales.

**CONICET**: Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas.

COST: modelo de corrección de efectos atmosféricos.

CV : coeficiente de variación.

CyUS, UyCS: cobertura y uso de suelo.

DCca: densidad de habitantes en la superficie de la cuenca.

DEM, MDE: modelo de elevación del terreno.

**DN**, **ND**: número digital.

DOS: modelo de corrección de efectos atmosféricos.

DSEd : densidad de habitantes en la superficie edificada.

**DSHU**: densidad de habitantes en la huella urbana.

DTC: clasificador de árboles de decisión.

DVI: índice de diferencia de vegetación

**EA**: espacio abierto.

**EAC**: espacio abierto capturado.

**EAE**: espacio abierto exterior.

EAM: espacio abierto marginal.

EBBI: índice mejorado de edificación y suelo desnudo.

EO: dirección este-oeste.

**EPSG**: European Petroleum Survey Group.

ERA: espacio rural abierto.

**ERE**: espacio rural exterior.

ERU: espacio dentro del radio urbano.

ETM+: instrumento a bordo de Landsat: Enhanced Thematic Mapper Plus.

EVI: índice mejorado de vegetación.

FAMAF: Facultad de Astronomía, Matemática, Física y Computación. Universidad Nacional de Córdoba.

FCEFyN: Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Universidad Nacional de Córdoba.

GCO : Gran Córdoba.GE : Google Earth.

GEMI : índice de vegetación no lineal.

GeoTIFF: información georreferenciada en archivo de imagen de formato TIFF.

GIS, SIG: sistema de información geográfica.

**HRur**: huella rural.

HTML: lenguaje de marcas de hipertexto.

HU, Hurb: huella urbana.IBI: Index based built-up indexIDE: entorno de desarrollo.

IDECOR: Infraestructura de Datos Espaciales de la Provincia de Córdoba.

**IEA**: Índice de espacio abierto.

IEEE : Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos.

IG: Instituto Gulich.

IGN: Instituto Geográfico Nacional.

IL: modelo de iluminación.

InB: índice de borde.

INDEC : Instituto Nacional de Estadística y Censos.

InEA: índice de espacio abierto.

**IR**: infrarrojo.

JM: distancia Jeffries-Matusita.

KML: archivo de polígonos formato Keyhole Markup Language.

L: referencia a plataforma satelital Landsat.

L1, L2..L8: plataforma landsat 1,2 ..8.

MBI: índice de edificación modificado.

MDE, DEM: modelo digital de elevaciones.

**MDEAr :** producto MDE de 5m, fotogramétrico IGN.

MDP: modelo digital de pendientes.

ML, MLC, MV: algoritmo de máxima verosimilitud.

MNDWI: índice NDWI modificado.
MSAVI: índice SAVI modificado.

MSS: Multispectral Scanner.

NASA: Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio.

NBAI : índice de área edificada normalizada.

NBI : Nuevo índice de edificación.NBR : relación de área quemada.

NC: no clasificado.

NC-U, U-NC : píxeles intercambiados, urbanos-no clasificados, escenas invernales-estivales.

ND: número digital.

 $\mathbf{NDBI}:$  diferencia normalizada de superficie construida.

**NDII**: diferencia normalizada de superficie impermeable.

NDISI : índice de diferencia normalizada de superficie impermeable.

NDSI: índice de diferencia normalizada de suelo.

NDSV: vector espectral de diferencia normalizada.

NDVI: índice de diferencia normalizada de vegetación.

NDWI: índice de diferencia normalizada de agua.

NE : dirección nor-este.NIR : infrarrojo cercano.

NMDWI: índice modificado de diferencia normalizada de agua.

NOAA: National Oceanic and Atmospheric Administration.

 $\mathbf{NS}$ : dirección norte-sur.

O: dirección oeste.

OE: dirección oeste-este.

OLI : instrumento a bordo de Landsat: Operational Land Imager

**OLS**: órdinal lineal regression.

P: pendiente.

PG: presición global.

PVI : índice perpendicular de vegetación.

QA: quality assurance.R: banda espectral rojo.

RAM: memoria de acceso aleatorio.

REAU, ReEAU: relación de espacio abierto urbano.

RHU, ReHU: relación de huella urbana.

RGB, RVA: rojo-verde-azul. O RVA es la composición del color en términos de la intensidad de los colores primarios de la luz.

RNDSI : relación de diferencia normalizada de suelo.

ROI : región de interés.

S-A : clases temáticas suelo-agua.

SAGA: System for Automated Geoscientific Analyses.

SAMC: mapeador de ángulo espectral.

SAVI : índice de vegetación ajustado por suelo.

SCS : sun canopy sensor.SE : dirección sur-este.

 $\mathbf{Sed}$  : superficie edificada.

SHU: superficie huella urbana.SHV: starting haze Value.

 $\mathbf{SR},\,\mathbf{S}\text{-}\mathbf{R}$  : clase sue lo desnudo.

**SRTM**: Shuttle Radar Topography Mission.

SSI: índice de suelo.

 ${\bf SRTM}$ : Misión Topográfica Shuttle Radar.

S-V : clases temáticas suelo-vegetación SVMC : máquina de soporte vectorial.

SWIR: infrarrojo de oda corta.

SWIR-NIR: infrarrojo onda corta y cercana.

**TIFF**: formato de codificación de imágenes (Tagged Image File Format).

TIN : red de triángulos irregulares.

TIR: infrarrojo termal.

TIRS : instrumento a bordo de Landsat: Thermal Infrared Sensor.

 $\mathbf{TM}$  : instrumento a bordo de Landsat: The matic Mapper.

TOA: tope de atmósfera.

 $\mathbf{U}$ : según contexto: clase temática edificado o urbanizado.

U-A : clases temáticas urbano-agua

UNC: Universidad Nacional de Córdoba.

U-S: clases temáticas edificado-suelo desnudo.

**USGS**: Us Geological Survey.

**UTM**: Universal Transverse Mercator.

U-V : clases temáticas edificado-vegetación.

V : según contexto: clase temática vegetación o banda espectral verde.

VS: clase temática vegetación y suelo desnudo.

WGS: World Geodetic System.

## Capítulo 1

# Introducción

El crecimiento poblacional a escala mundial de las últimas décadas, y su concentración en centros poblados es innegable. La redistribución de la población entre las áreas rurales y las urbes comenzó en el siglo XVIII, cuando sólo el 3 % de los habitantes residían en ciudades. La revolución industrial y el exceso de mano de obra producida por ella entre los trabajadores rurales promovió la migración hacia las ciudades. En 1950 el 28 % de la población estaba urbanizada y para 2007, el 50 % [1]. Según las prospecciones de Naciones Unidas , la población mundial alcanzó los 7.713 millones de habitantes en 2019, con el 55 % de éstos residiendo en áreas urbanas. Se ha estimado que en 2050 la población alcanzaría los 9.000 millones, con el 68 % de éstos residiendo en centros urbanos debido tanto al éxodo rural como al crecimiento demográfico interno de las ciudades [2], [3].

El aumento de la población y los fenómenos migratorios entre localidades y entre zonas rurales y urbanas va acompañado de un crecimiento del área edificada y la urbanización [3], [4]. La División de Desarrollo Urbano del Banco Mundial estimó que las ciudades de los países en desarrollo duplicarían su tamaño entre los años 2000 y 2030 [5]. La dinámica de este crecimiento está descrita como un proceso complejo de difusión, que afecta el paisaje rural en diferentes escalas y con distintos grados de heterogeneidad [6], que por su ritmo y escala juega un papel cada vez más importante en el flujo de materiales y las transformaciones de terreno y el clima [7]. La geomorfología antropogénica apunta al desarrollo urbano como una de las principales fuerzas modificadoras de las características de la superficie terrestre. Se estima que un tercio de la superficie continental terrestre se encuentra, de alguna manera, afectada por las actividades humanas. El 2% de los continentes están cubiertos por áreas edificadas que sufren la modificación superficial más intensa, estudios comparativos realizados en Estados Unidos demuestran que la erosión de origen antropogénico supera en órdenes de magnitud a la de la erosión hídrica natural, anteriormente, la principal responsable de la modificación de la superficie terrestre por el transporte de materiales [1].

Los materiales impermeables utilizados en construcción reemplazan la cobertura natural del suelo, modificando la temperatura local, generando islas de calor. El descenso de permeabilidad del suelo favorece la colección de agua en ocurrencia de precipitaciones, que al no ser absorbida, genera un aumento de caudal en el punto de descarga, y por arrastre, un aumento del transporte fluvial de las partículas [8], [9]. Estudios recientes confirman esto al demostrar que las actividades humanas incrementaron el transporte fluvial global de sedimentos, la movilización de rocas y materiales no consolidados de origen antrópico se estimaron entre uno o dos órdenes de magnitud mayor que la denudación y transporte por procesos naturales. Las áreas disturbadas por excavación o acumulación, productos tanto del desarrollo de actividades agrícola-ganadera como del desarrollo inmobiliario e infraestructura urbana asociada a él, contribuyen significativamente a la generación de sedimentos

[10]. Al mismo tiempo estos estudios sostienen que se redujo el flujo global de sedimentos hacia los océanos, a través de su retención en reservorios continentales [11].

Tanto el aporte de material sedimentable como el volcamiento de aguas residuales, tratadas y sin tratar, de las poblaciones presentes en las riveras y cuencas de drenaje [12], [13] reducen la capacidad de almacenamiento de un embalse y alteran la calidad de sus aguas, promoviendo la eutrofización de las mismas, y afectando su aptitud para el aprovisionamiento de agua potable. Los efectos de la eutrofización son diversos y a veces espectaculares, como puede advertirse por la mancha verdosa, correspondiente a una explosión algal, presente en la imagen satelital de la figura 1.

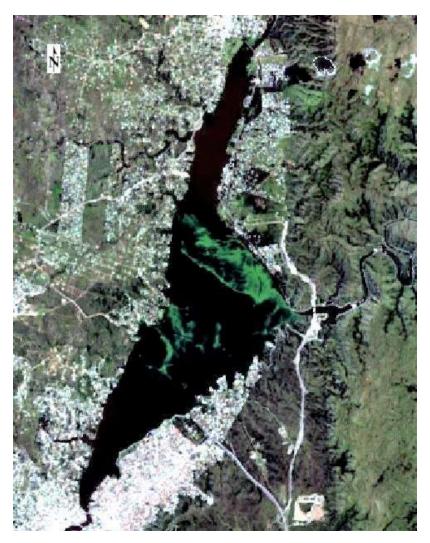


Figura 1: Composición color real. Imagen de la plataforma Landsat 8 del embalse San Roque, tomada el 6 de febrero de 2019 donde se aprecia un afloramiento de algas (mancha verde en el cuerpo lacustre).

Además de los efectos sobre el transporte de material y el equilibrio radiativo de la superficie que redunda en mayores temperaturas locales, el desarrollo urbano impacta por transformación de la cobertura y uso del suelo, desplazando la vegetación original, modificando el régimen hídrico natural [14]. La cuenca hidrográfica del embalse San Roque, correspondiente a la cuenca alta del río Suquía, en la provincia de Córdoba, Argentina, ha visto un incremento mayor al 400 % en el número de habitantes residentes en su territorio, entre los años 1960 y 2010 [15], [16]. Las localidades de la misma han dejado de ser entidades aisladas y se han convertido en un conglomerado urbano, una extensión continua de paisaje urbanizado que envuelve el cuerpo lacustre, como puede apreciarse en imágenes satelitales

disponibles en plataformas como Google Earth [17] (ver fig 2). Este aumento en la presión antrópica en la cuenca puede explicar, en parte, el incremento en la frecuencia de los episodios de afloración algar registrados en el embalse [18]. El aumento de las edificaciones asociadas al aumento de población, se vuelve muy relevante si se tiene en cuenta que la cuenca del San Roque, naciente del río Suquía, fuente de provisión de agua potable de la ciudad de Córdoba, pertenece a una región semiárida, con un régimen de precipitaciones concentrado en épocas estivales. Por ello la disponibilidad constante de agua depende del efecto amortiguador de la escorrentía, generado por el efecto esponja promovido por la cobertura vegetal y su sistema radicular (retención del agua, saturación del suelo y liberación lenta posterior). Es éste uno de los efectos indirectos y negativos del desarrollo urbano, que en el área de estudio cobra un carácter de importancia singular, que puede afectar directamente a un importante número de pobladores de la provincia de Córdoba.



Figura 2: Crecimiento urbano en las inmediaciones del embalse San Roque (mancha claras). Izquierda: 1986, derecha: 2019. Imágenes obtenidas desde la plataforma Google Earth.

En la actualidad, las localidades de la cuenca sufren del deterioro del equilibrio hídrico, que se plasma como escasez en tiempo de sequía, peores calidades del agua suministrada, y ocurrencia de riadas y deslizamientos en épocas de lluvia. Las disputas sociales por el recurso se hacen cada vez mas frecuentes y complejas [14]. El crecimiento urbano no planificado y sin acompañamiento de infraestructuras correspondientes, configura un complejo escenario socio ecológico en la actualidad. En este escenario dos grandes fuerzas se pujan por el dominio de los espacios, por un lado la necesidad de espacio habitacional y económico-recreativo, la necesidad de servicios como agua, electricidad y transporte, y por el otro, la conservación del medio (hábitat hídrico, vegetal-animal, geomorfologico y paisajístico, entre otros). Estas fuerzas se encuentran en una lucha de poder constante. Es perentorio establecer lineamientos y acciones de orden que tiendan a generar un equilibrio y sustentabilidad entre estos dos aspectos, que podemos sintetizar como de uso y de protección. Es en este punto donde es crítico fomentar estudios científicos, que aporten datos objetivos sobre el impacto que la urbanización y la geomorfología antrópica tiene en las distintas regiones de la provincia y sobre todo en las cuencas hidrográficas.

El crecimiento, no planificado y disperso, afecta áreas mayores con menor densidad de población establecida. Es allí donde determinar la evolución del tamaño de las localidades y el área afectada

por unidad de habitantes, medida de su eficiencia para alojarlos, resulta útil para evaluar la situación actual y la tendencia a futuro.

En cuanto a la dinámica del desarrollo urbano de la zona, son diversos los enfoques y estudios que permiten analizar y explicar el rápido crecimiento de las urbanizaciones, en Argentina y en la cuenca del embalse San Roque. Al respecto se mencionan y amplían brevemente algunos conceptos en la sección B del apéndice: "Aspectos del crecimiento poblacional de Córdoba y Punilla". Este desarrollo se puede rastrear desde el éxodo rural y el crecimiento de las grandes ciudades, a partir de 1930, hasta la aparición de barrios cerrados periféricos en 1990, y el desarrollo del Gran Córdoba y Gran Punilla, favorecidos por la cercanía a la capital provincial, los medios de transporte, las redes de comunicación, el efecto tractor de la industria turística y la oferta de espacio residencial privado [19]. Los especialistas sostienen que el balance de población será desigual a nivel regional y local, gobernado por la intensidad de las migraciones externas e internas. La provincia de Córdoba evidencia una dinámica desigual con crecimiento y retracción poblacional y urbana según la localidad. Mientras la tendencia general de las localidades pequeñas (menos de 2.000 habitantes) y zonas rurales es el estancamiento y el despoblamiento, como ocurre en los departamentos del norte y oeste de la provincia, y algunas localidades del sur y este provincial [4], otros sectores como las localidades del Sur y centro del departamento Punilla presentan crecimiento poblacional y aumento marcado de la urbanización, independientemente del número de habitantes de las mismas.

El proceso mismo del crecimiento urbano es complejo, desde lo físico y desde lo social y humano. El modelo urbano moncéntrico ayuda a comprender algunas relaciones importantes entre factores físicos, económicos y humanos [20]. No hay una solución obvia, simple y óptima que permita definir la mejor estrategia de desarrollo. La orografía del lugar, aspectos económicos como transporte de personas y provisiones, preferencias y estilo de vida de los pobladores, entramados sociales, sistemas políticos, diversidad biológica y equilibrios de los ciclos naturales, constituyen una parte solamente de los factores que intervienen en cualquier solución planeada al problema del crecimiento no controlado de la urbanización.

Todos los datos que se puedan producir, relacionados a la problemática urbana, resultan necesariamente útiles para la construcción de modelos predictivos y la búsqueda de soluciones. El presente trabajo de investigación, dirige sus esfuerzos a esa tarea. Utiliza escenas satelitales de diferentes décadas, combinadas con herramientas de teledetección satelital [21], para determinar el crecimiento de la superficie edificada y su relación con variables geográficas y geológicas, en la cuenca hidrográfica del embalse San Roque, principal cuerpo de agua del departamento Punilla, en la provincia de Córdoba. Es un estudio exploratorio de las capacidades de la ciencia de datos espaciales y de la historia del desarrollo urbano de la zona, que pretende generar una metodología práctica y funcional, que aporte datos sobre lo sucedido en materia de urbanización en el área de estudio en las últimas décadas.

En los capítulos sucesivos se presentan los fundamentos metodológicos, la metodología implementada y resultados obtenidos. En el capítulo 2 se describe el área de estudio y sus orígenes, se da cuenta de los principios científicos y aspectos técnicos de la teledetección, y la utilización de clasificación de imágenes para generar mapas temáticos de cobertura de suelo, se describen las fuentes de datos y herramientas computacionales empleadas, y los aspectos fundamentales de la determinación de la fragmentación urbana. El capítulo 3 describe el procesamiento de los datos, el pre-tratamiento y transformación de las escenas satelitales empleadas, el procedimiento de clasificación temática, su implementación y optimización. También se menciona el proceso de segmentación del espacio edificado empleado en la determinación de la huella urbana. En el capítulo 4 se presentan los resultados, que incluyen la determinación del crecimiento de las superficies urbanas y sus densidades poblacionales, se comparan los mismos con otras publicaciones y se abordan de modo exploratorio la correlación entre

la edificación (total y nueva) con las siguientes variables geográficas y geomorfológicas del terreno: proximidad a caminos principales y cursos de agua, pendientes, elevaciones, orientación del terreno y geoformas. En el capítulo 5 se discuten los resultados obtenidos. La obra cuenta también con un apéndice en el que se profundizan y detallan aspectos diversos como la relación entre el medio ambiente y el crecimiento poblacional y urbano, análisis de las distribuciones estadísticas y propagación de errores de algunos productos generados, y descripciones detalladas de algunos procesos y cómputos. Además se presentan los mapas generados, tablas numéricas, descripciones de algunos métodos gráficos de presentación de datos, y la descripción de un software informático (Ardema), prototipo implementado como herramienta de apoyo para el procesamiento de las imágenes, sin el cual, este trabajo de tesis no podría haberse desarrollado con el nivel de análisis y calidad presentados.

### 1.1. Hipótesis

Esta tesis sostiene que se puede desarrollar una metodología de análisis de datos espaciales que integre productos Landsat de diferentes plataformas satelitales y características para determinar la evolución del crecimiento de la urbanización en la cuenca del San Roque en un período de varias décadas, sus características y el grado de asociación de las edificaciones con algunas variables geográficas y geomorfológicas seleccionadas.

### 1.2. Objetivos Generales

Los objetivos generales de esta tesis son evaluar la dinámica espacio-temporal del uso de suelo, relacionado al crecimiento urbano en el área de la cuenca del embalse San Roque a partir de imágenes satelitales. Generar una metodología de procesamiento común a todos los productos Landsat de nivel 1, que pueda ser utilizada en estudios similares en otras regiones del planeta, y que sirva además de herramienta de ordenamiento territorial, y para el estudio de las variables intervinientes en el crecimiento de las edificaciones, ayudando de esta manera a construir modelos predictivos ajustados a un área de estudio particular, permitiendo analizar el grado de relación de éste con otros procesos ambientales.

### 1.3. Objetivos Específicos

Los objetivos específicos son:

- Desarrollar una metodología de proprocesamiento y clasificación común, aplicable a todas las escenas Landsat nivel 1, generadas por los sensores Multispectral scaner, Tematic Mapper, Operational Land Imager y Termal Infrared Sensor, que adquirieron datos desde 1972 al 2020.
- Generar mapas temáticos de la cuenca del Embalse San Roque a partir de técnicas de clasificación de tipos de cobertura/uso de suelo.
- Generar mapas temáticos de la cuenca del Embalse San Roque a partir del análisis geomorfométrico, geológico y geográfico: mapas de pendiente, drenaje, aspecto del relieve, elevación y distancias a elementos de la red vial principal.
- Estimar la velocidad de crecimiento de las superficies urbanizadas en la cuenca hidrográfica.

■ Combinar mediante software de Sistema de Información Geográfica (SIG) la información de los diferentes mapas temáticos para analizar la dinámica espacio-temporal del crecimiento urbano y explorar su relación con variables del terreno.	