

**UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA**

**Programa de Doctorado en Arquitectura, Edificación, Urbanística y Paisaje**



**UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA**

**TESIS DOCTORAL**

**APLICACIÓN DE LA TECNOLOGÍA LIDAR  
EN EL ANÁLISIS VISUAL  
DE LA VALORACIÓN DEL PAISAJE**

**Candidato a Doctor:  
Julián Carlos Collado Latorre**

**Director:  
Dr. Francisco Javier Martínez Cortijo  
Tutor:  
Dr. Vicente Colomer Sendra**

**València, mayo de 2017**



A mis padres.



## **RESUMEN**

La tesis tiene como objetivo principal identificar los diferentes tipos de análisis visuales en la valoración del paisaje que pueden utilizarse actualmente y determinar la versatilidad e idoneidad del uso de la tecnología LiDAR para la obtención del análisis visual en la valoración del paisaje a escala municipal y de proyecto en comparación con las técnicas actuales en uso.

El análisis visual de la valoración del paisaje se realiza actualmente con programas informáticos de sistemas de información geográfica desde su aparición, los que incluyen herramientas para la realización del análisis visual para el cálculo de la cuenca visual a partir de modelos digitales de elevación y varios puntos de observación.

Los análisis visuales de la valoración del paisaje son relevantes en los instrumentos de gestión del paisaje de las normativas autonómicas específicas de España que trasponen el Convenio Europeo del Paisaje.

Esta investigación muestra cómo pueden utilizarse los datos LiDAR del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA) disponibles en el Centro Nacional de Información Geográfica, y los sistemas de información geográfica, para realizar el cálculo del análisis en la valoración del paisaje de forma más precisa. Para ello se han probado varios métodos de interpolación para la obtención del modelo digital de superficie en el término municipal de Navajas.

En la elaboración de los estudios de paisaje de la Comunitat Valencia para el análisis visual se están utilizando modelos digitales del terreno obtenidos a partir de las cotas y las curvas de nivel en formato digital con información tridimensional a escala 1:10.000 o modelos digitales del terreno con resolución de un metro obtenidos a partir de datos LiDAR, que omiten frecuentemente los elementos verticales, no se incorpora la vegetación, ni las construcciones ni otros elementos del medio físico. En muchos estudios se ha generado la cuenca visual con la ausencia de elementos importantes del paisaje que obstruyen la vista del observador.

En la generación de la cuenca visual se puede encontrar actualmente gran diversidad de programas informáticos de sistemas de información geográfica tanto libres como comerciales. En esta investigación se realiza una comparación de la cuenca visual obtenida a partir de distintos programas SIG utilizados frecuentemente en España, tanto libres como comerciales, donde se establecen relaciones con los resultados obtenidos y se mide el tiempo de procesamiento en la generación de una cuenca visual.

También se han comparado los análisis visuales obtenidos a partir de un modelo digital del terreno y el resultado de un modelo digital de superficie para determinar las similitudes y diferencias entre ellos.

Se realiza un análisis comparativo del método de análisis visual incluido en el contenido de los Estudios de paisaje de la Comunitat Valenciana realizado a partir del modelo digital de superficie obtenido a partir de los

datos LiDAR, de un modelo digital del terreno y un modelo digital de superficie urbana.

La investigación propone una metodología para la realización del análisis visual a escala de proyecto con la utilización de una cuenca visual de identificación y del modelo digital de superficie obtenido, donde también se realiza una comparación de los resultados con el modelo digital de superficie urbana.

## **ABSTRACT**

The thesis aims to identify the different types of visual analysis in landscape assessment that can be used today and determine the versatility and suitability of the use of LiDAR technology to obtain visual analysis in landscape assessment at the municipal level, compared with current techniques in use.

Visual analysis of the landscape assessment is currently carried out with geographic software information systems due to its appearance, which include tools for performing the visual analysis for the calculation of the viewshed from digital elevation models and various points.

The visual analysis of the landscape assessment are relevant in the landscape management instruments of the specific regional regulations of Spain that transpose the European Landscape Convention.

This research shows how LiDAR data from the Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA) available at the Centro Nacional de Información Geográfica, and that geographic information systems can be used to perform the calculation of the analysis in the assessment of the landscape more precisely. Moreover, several interpolation methods have been tried to obtain the digital surface model in the municipality of Navajas.



In the preparation of landscape studies of the Comunitat Valencia for the visual analysis are using digital terrain models obtained from the dimensions and curves in digital format with three-dimensional information at scale 1: 10,000 or digital terrain models with a resolution of one meter obtained from LiDAR data, which frequently omit vertical elements, vegetation, buildings or other elements of the physical environment are not incorporated. In many studies the viewshed has been generated with the absence of important elements of the landscape that obstruct the view of the observer.

In the generation of the viewshed one can find at present a great diversity of software of geographic information systems just as many free as commercial. In this research a comparison of the viewshed obtained from different GIS programs frequently used in Spain, both free and commercial, is made, where relationships are established with the results obtained and the processing time is measured in the generation of a viewshed.

It also was compared the visual analysis obtained from a digital terrain model and the result of a digital surface model to determine the similarities and differences between them.

A comparative analysis of the visual analysis method included in the content of the Landscape Studies of the Comunitat Valenciana is carried out from the digital surface model obtained from the LiDAR data, a digital terrain model and a digital model of urban surface.

This research proposes a methodology for carrying out the visual analysis at the project scale with the use of a identifying viewshed and the digital surface model obtained, where there is a comparison of the results with that of the digital urban surface model.

## RESUM

La tesi té com objectiu principal identificar els diferents tipus d'anàlisi visuals a la valoració del paisatge que es poden utilitzar actualment i determinar la versatilitat i idoneïtat de l'ús de la tecnologia LiDAR per a l'obtenció de l'anàlisi visual a la valoració del paisatge a escala municipal i de projecte en comparació amb les tècniques actuals en ús.

L'anàlisi visual de la valoració del paisatge es realitza actualment amb programes informàtics de sistemes d'informació geogràfica des de la seua aparició, els que inclouen eines per la realització de l'anàlisi visual per al càlcul de la conca visual a partir de models digitals d'elevació i diversos punts de observació.

Els anàlisis visuals de la valoració del paisatge son rellevants en els instruments de gestió del paisatge de les normatives específiques autonòmiques d'Espanya que transposen el Conveni Europeu del Paisatge.

Aquesta investigació mostra com poden utilitzar les dades lidar del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA) disponibles al Centro Nacional de Información Geográfica, i els sistemes d'informació geogràfica, per realitzar el càlcul de l'anàlisi en la valoració del paisatge de forma més precisa, per això s'han provat diversos mètodes d'interpolació per a l'obtenció del model digital de superfície al terme municipal de Navajas.

En l'elaboració dels estudis de paisatge de la Comunitat Valenciana per a l'anàlisi visual s'estan utilitzant models digitals del terreny obtinguts a partir de les cotes i les corbes de nivell en format tridimensional amb informació digital d'una escala 1: 10.000 o models digitals del terreny amb resolució d'un metre obtinguts a partir de dades LiDAR, que ometen freqüentment els elements verticals, no incorpora la vegetació, ni les construccions ni altres elements del medi físic. Al molts estudis s'ha generat la conca visual amb l'absència d'elements importants del paisatge que obstrueixen la vista de l'observador.

A la generació de la conca visual es pot trobar actualment gran diversitat de programes informàtics de sistemes d'informació geogràfica del tant lliures com comercials. En aquesta investigació es realitza una comparació de la conca visual obtinguda a partir de diferents programes SIG utilitzats freqüentment a Espanya, tant lliures com comercials, on s'estableixen relacions amb els resultats obtinguts i es mesura el temps de processament en la generació d'una conca visual.

També s'han comparat les anàlisis visuals obtinguts a partir d'un model digital del terreny i el resultat d'un model digital de superfície per determinar les similituds i diferències entre ells.

Es realitza un anàlisi comparatiu del mètode d'anàlisi visual inclòs en el contingut dels estudis de paisatge de la comunitat valenciana realitzat a partir del model digital de superfície obtingut a partir de les dades LiDAR d'un model digital del terreny i d'un model digital de superfície urbana.

La investigació proposa una metodologia per la realització de l'anàlisi d'una escala de projecte amb la utilització d'una conca visual d'identificació i del model digital de superfície obtingut visual, on també es fa una comparació dels resultats amb el model digital de superfície urbana.



## ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN.....	3
2.	OBJETIVOS .....	9
2.1	Objetivos generales .....	9
2.2	Objetivos específicos .....	9
3.	ANTECEDENTES.....	13
3.1	La tecnología LiDAR ALS .....	13
3.2	Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA) .....	15
3.3	Tipos de análisis visual .....	17
3.3.1	Cuenca visual .....	17
3.3.1.1	Tipos de cuenca visual .....	21
3.3.1.1.1	Cuenca visual simple.....	21
3.3.1.1.2	Cuenca visual múltiple.....	22
3.3.1.1.3	Cuenca visual acumulada.....	23
3.3.1.1.4	Cuenca visual total .....	23
3.3.1.1.5	Cuenca visual inversa.....	24
3.3.1.1.6	Cuenca visual probable .....	25
3.3.1.1.7	Cuenca visual de identificación.....	26
3.3.1.1.8	Cuenca visual difusa.....	27
3.3.1.1.9	Cuenca visual Higuchi .....	28
3.3.1.1.10	Cuenca visual de los horizontes.....	30
3.3.2	Intervisibilidad .....	31
3.3.3	Isovista.....	32
3.3.4	<i>Viewsphere</i> .....	34
3.3.5	Factor <i>Sky-view</i> .....	35

3.3.6	Magnitud visual.....	36
3.3.7	Apertura visual.....	37
3.4	La cuenca visual en los sistemas de información geográfica SIG.	38
3.5	Normativa de paisaje.....	40
3.5.1	El Convenio Europeo del Paisaje.....	40
3.5.2	La legislación de paisaje en España y en las Comunidades Autónomas.....	41
3.5.2.1	Instrumentos de gestión del paisaje en la normativa de paisaje de las Comunidades Autónomas.....	43
3.5.2.1.1	Cantabria.....	43
3.5.2.1.2	Cataluña.....	44
3.5.2.1.3	Comunitat Valenciana.....	44
3.5.2.1.4	País Vasco.....	44
3.5.2.1.5	Murcia.....	45
3.6	Métodos de valoración del paisaje.....	46
3.6.1	Métodos directos.....	46
3.6.1.1	Métodos directos de subjetividad aceptada.....	46
3.6.1.2	Métodos directos de subjetividad controlada.....	47
3.6.1.3	Métodos directos de subjetividad compartida.....	48
3.6.1.4	Métodos directos de subjetividad representativa.....	48
3.6.2	Métodos indirectos.....	48
3.6.2.1	Métodos de valoración a través de componentes del paisaje	49
3.6.2.2	Métodos de valoración a través de categorías estéticas.....	49
3.6.3	Métodos mixtos.....	50



---

3.6.4	Aplicaciones de los métodos de valoración del paisaje a partir de cartografía .....	50
3.7	Modelos digitales de elevaciones, modelos digitales el terreno y modelos digitales de superficie .....	52
3.7.1	Definiciones .....	52
3.7.2	Métodos de interpolación para la obtención de un modelo digital de superficie .....	55
3.7.2.1	Distancia inversa ponderada (IDW) .....	55
3.7.2.2	Topo a ráster .....	55
3.7.2.3	Kriging .....	56
3.7.2.4	Vecino natural .....	58
3.7.2.5	TIN a ráster .....	58
3.7.2.6	Punto a ráster .....	59
3.7.2.7	Superficie de mínima curvatura Spline .....	59
4.	MARCO TEÓRICO .....	63
4.1	Estudios previos sobre la generación de modelos digitales de superficie a partir de datos LiDAR .....	63
4.2	Estudios previos sobre la comparación de la cuenca visual realizada a partir de diferentes programas informáticos de SIG .....	65
4.3	Estudios previos sobre la realización de la cuenca visual a partir de datos LiDAR .....	69
4.4	Estudios previos sobre el análisis de la visibilidad en el planeamiento urbanístico .....	75
5.	MATERIALES Y MÉTODOS .....	81
5.1	Materiales .....	81
5.1.1	Área de estudio .....	81
5.1.2	Datos LiDAR .....	82

5.1.3	Capas vectoriales .....	84
5.1.4	Modelo digital del terreno.....	87
5.2	Metodología.....	87
5.2.1	Generación de un modelo digital de superficie a partir de datos LiDAR.....	87
5.2.1.1	Procesado de los datos/algoritmos de creación de modelos digitales de superficie (MDS).....	87
5.2.1.2	Preparación de datos LiDAR.....	88
5.2.1.3	Creación de los modelos digitales de superficie (MDS) .....	89
5.2.1.4	Evaluación de la precisión en la interpolación del modelo digital de superficie .....	90
5.2.1.5	Comparación entre cuencas visuales realizadas con cada método de interpolación.....	92
5.2.1.6	Generación de perfiles longitudinales .....	95
5.2.2	Análisis comparativo de la cuenca visual realizada a partir de distintos sistemas de información geográfica.....	98
5.2.2.1	Cuenca visual realizada con ArcGIS .....	100
5.2.2.2	Cuenca visual realizada con gvSIG.....	101
5.2.2.3	Cuenca visual realizada con ENVI .....	102
5.2.2.4	Cuenca visual realizada con QGIS.....	103
5.2.2.5	Cuenca visual realizada con GRASS .....	105
5.2.2.6	Análisis estadístico de las cuencas visuales de distintos programas SIG .....	105
5.2.3	Estudio comparativo del análisis visual realizado a partir de modelos digitales distintos.....	106

---

5.2.3.1	Creación de un modelo digital de superficie con las edificaciones del catastro.....	106
5.2.3.2	Aplicación de la metodología de análisis visual de la Comunitat Valenciana.....	107
5.2.3.3	Concordancia de los análisis visuales .....	112
5.2.3.4	Índice de Kappa .....	112
5.2.3.5	Comparación por categorías .....	114
5.2.4	Análisis visual para estudios de integración paisajística a partir de un modelo digital de superficie obtenido de datos LiDAR .....	114
5.2.4.1	Adición del edificio propuesto en los modelos digitales de superficie .....	115
5.2.4.2	Determinación de la cuenca visual de identificación	116
6.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	119
6.1	Resultados de la creación de modelos digitales de superficie (MDS)	119
6.1.1	Precisión de los modelos digitales de superficie.....	119
6.1.2	Resultados comparación entre cuencas visuales realizadas con cada método de interpolación .....	126
6.1.3	Resultados Perfiles longitudinales.....	127
6.2	Resultados de la comparación de la cuenca visual realizada a partir de distintos sistemas de información geográfica.....	137
6.2.1	Diferencias entre programas .....	137
6.2.2	Tiempo de procesamiento .....	144
6.3	Resultados obtenidos en el estudio comparativo del análisis visual realizado a partir de distintos modelos digitales .....	145
6.3.1	Índice de Kappa .....	148

6.3.2	Método por categoría.....	151
6.4	Resultados del análisis visual de estudios de integración paisajística a partir de un modelo digital de superficie obtenido de datos LiDAR.....	157
7.	CONCLUSIONES .....	167
8.	LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN.....	173
9.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	177
10.	ANEXOS .....	193
10.1	ANEXO I Correlación entre cuencas visuales de distintos modelos digitales de superficie .....	195
10.2	ANEXO II Cuencas visuales según punto de vista y programa .....	201
10.3	ANEXO III Diferencias entre cuencas visuales .....	206

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Escala de valores de paisaje .....	47
Tabla 2.	Coordenadas UTM de los puntos de observación .....	100
Tabla 3.	Escala de fuerza de concordancia según coeficiente de Kappa .....	113
Tabla 4.	Error medio absoluto y error medio cuadrático .....	121
Tabla 5.	Número de celdas visibles.....	139
Tabla 6.	Nº de celdas iguales entre programas.....	139
Tabla 7.	Nº de celdas iguales y diferentes ArcGIS vs. ENVI .....	141
Tabla 8.	Nº de celdas iguales y diferentes ArcGIS vs. gvSIG .....	141
Tabla 9.	Nº de celdas iguales y diferentes ENVI vs. QGIS .....	141

---

Tabla 10. N° de celdas iguales y diferentes ENVI vs. QGIS.....	142
Tabla 11. N° de celdas iguales y diferentes ENVI vs. gvSIG.....	142
Tabla 12. N° de celdas iguales y diferentes gvSIG vs. QGIS .....	142
Tabla 13. Coeficientes de correlación de las cuencas visuales según programa .....	143
Tabla 14. Porcentaje de celdas diferentes.....	143
Tabla 15. Tiempos de procesamiento en la generación de las cuencas visuales .....	144
Tabla 16. Coeficientes globales de los estadísticos de Kappa para la comparación MDS-MDT .....	149
Tabla 17. Coeficientes por categorías de los estadísticos de Kappa para la comparación MDS-MDT.....	149
Tabla 18. Coeficientes globales de los estadísticos de Kappa para la comparación MDS - (2,5-DUSM) .....	149
Tabla 19. Coeficientes por categorías de los estadísticos de Kappa para la comparación MDS - (2,5-DUSM).....	150
Tabla 20. Comparación de mapas por categoría MDS-(MDT) .....	153
Tabla 21. Comparación de mapas por categoría MDS-(2,5-DUSM) ...	155
Tabla 22. Tabla de atributos de la cuenca visual de identificación a partir del modelo digital de superficie.....	163
Tabla 23. Tabla de atributos de la cuenca visual de identificación a partir del modelo digital de superficie urbana (2,5-DUSM) .....	163

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Cuenca visual .....	17
Figura 2. Isovista (Proporcionada por Weitkamp).....	33
Figura 3. <i>Viewsphere</i> (Proporcionada por Putra).....	35
Figura 4. Factor Sky-view (Proporcionada por Žiga Kokalj).....	36
Figura 5. Diferencias entre modelo digital de superficie y modelo digital de terreno.....	54
Figura 6. Localización del municipio de Navajas .....	81
Figura 7. Ortofoto del municipio de Navajas .....	82
Figura 8. Ubicación de los puntos de observación del estudio de paisaje de Navajas .....	86
Figura 9. Ubicación de los perfiles longitudinales .....	97
Figura 10. Visualización 3D del modelo digital de superficie con resolución de 1 m.....	98
Figura 11. Ubicación de los puntos de observación.....	100
Figura 12. Viewshed en ArcGIS .....	101
Figura 13. R2 Viewshed en gvSIG .....	102
Figura 14. Viewshed Analysis en ENVI .....	103
Figura 15. Viewshed analysis en QGIS .....	104
Figura 16. Proceso en Model Builder del análisis visual .....	111
Figura 17. Error medio cuadrático según tamaño de celda.....	123
Figura 18. Error medio cuadrático según método de interpolación .....	124
Figura 19. Error medio absoluto según tamaño de celda .....	124
Figura 20. Error medio absoluto según método de interpolación .....	125
Figura 21. Segmento del perfil agrícola 1 .....	128

---

Figura 22. Perfil zona agrícola A1 .....	128
Figura 23. Segmento del perfil agrícola 2 .....	129
Figura 24. Perfil zona agrícola A2.....	129
Figura 25. Segmento del perfil forestal 1 .....	130
Figura 26. Perfil zona forestal F1.....	130
Figura 27. Segmento del perfil forestal 2 .....	131
Figura 28. Perfil zona forestal F2.....	131
Figura 29. Segmento del perfil urbano 1 .....	132
Figura 30. Perfil zona urbano U1 .....	132
Figura 31. Segmento del perfil urbano 2.....	133
Figura 32. Perfil zona urbano U2.....	133
Figura 33. Modelo digital de superficie con resolución de 1m.....	134
Figura 34. Modelo digital de superficie con resolución de 2m.....	135
Figura 35. Modelo digital de superficie con resolución de 5m.....	136
Figura 36. Modelo digital de superficie con resolución de 10 m.....	137
Figura 37. Error producido en GRASS.....	138
Figura 38. N° de celdas iguales entre programas por punto de observación .....	140
Figura 39. Análisis visual realizado a partir del MDS .....	146
Figura 40. Análisis visual realizado a partir del MDT .....	147
Figura 41. Análisis visual realizado a partir del 2,5-DUSM.....	148
Figura 42. Comparación por categorías MDS-MDT .....	152
Figura 43. Comparación por categorías MDS-(2,5-DUSM).....	154
Figura 44. Localización del edificio en el modelo digital de superficie. 158	
Figura 45. Localización del edificio en el 2,5-DUSM .....	158
Figura 46. Cuenca visual de identificación a partir del modelo digital de superficie .....	160

Figura 47. Cuenca visual de identificación a partir del modelo digital de superficie respecto del edificio .....	161
Figura 48. Cuenca visual de identificación a partir del modelo digital de superficie urbana 82,5-DUSM) .....	162
Figura I. 1. Coeficiente de correlación Topo a ráster - IDW .....	195
Figura I. 2. Coeficiente de correlación Topo a ráster - Punto a ráster.	196
Figura I. 3. Coeficiente de correlación Topo a ráster - TIN a ráster ....	196
Figura I. 4. Coeficiente de correlación Topo a ráster - Vecino natural	197
Figura I. 5. Coeficiente de correlación IDW - Punto a ráster.....	197
Figura I. 6. Coeficiente de correlación IDW - TIN a ráster .....	198
Figura I. 7. Coeficiente de correlación IDW - Vecino natural .....	198
Figura I. 8. Coeficiente de correlación Punto a ráster - TIN a ráster ...	199
Figura I. 9. Coeficiente de correlación Punto a ráster - Vecino natural	199
Figura I. 10. Coeficiente de correlación TIN a ráster - Vecino natural.	200
Figura II. 1. Cuenca visual del punto 1 .....	201
Figura II. 2. Cuenca visual del punto 2 .....	202
Figura II. 3. Cuenca visual del punto 3 .....	203
Figura II. 4. Cuenca visual del punto 4 .....	204
Figura II. 5. Cuenca visual del punto 5 .....	205
Figura III. 1. Diferencias cuencas visuales entre programas del punto 1 .....	206
Figura III. 2. Diferencias cuencas visuales entre programas del punto 2 .....	207



Figura III. 3. Diferencias cuencas visuales entre programas del punto 3	208
Figura III. 4. Diferencias cuencas visuales entre programas del punto 4	209
Figura III. 5. Diferencias cuencas visuales entre programas del punto 5	210

## ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1	26
Ecuación 2	91
Ecuación 3	94
Ecuación 4	95
Ecuación 5	112
Ecuación 6	113
Ecuación 7	113



## **LISTADO DE ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS**

ALS: Láser Escáner Aerotransportado

CE: Comunidad Europea

CEP: Convenio Europeo del Paisaje

CHM: Modelo de Altura de la Copa

GPS: Sistema Global de Posicionamiento

ICV: Instituto Cartográfico Valenciano

IDW: Distancia inversa Ponderada

IMU: Unidad de Medida Interna

INSPIRE: Infraestructura de Información Espacial en la Comunidad Europea

LIDAR: Light Detection And Ranging

LOS: Línea de Visión

MDE: Modelo Digital de Elevaciones

MDS: Modelo Digital de Superficie

MDT: Modelo Digital del Terreno

MLS: Láser Escáner Móvil

nMDS: Modelo Digital de Superficie normalizado

OK: Original Kriging

PNOA: Plan Nacional de Ortofotografía Aérea

SIG: Sistema de Información geográfica

TIN: Red Irregular de Triángulos

TLS: Láser Escáner Terrestre

UK: Universal Kriging

2,5-DUSM: Modelo 2,5-Digital de Superficie Urbana



## **1. INTRODUCCIÓN**



## 1. INTRODUCCIÓN

La tecnología LiDAR (*Light Detection And Ranging*) es un sistema activo de detección remota basado en un escáner láser para realizar modelos digitales de superficie precisos en comparación con otras técnicas, que emergió comercialmente a mediados del siglo XX. La tecnología LiDAR en la actualidad ha sido aplicada principalmente en estudios de gestión forestal, detección automática de edificios y de usos del suelo, estudios arqueológicos.

La utilización de esta tecnología va a permitir obtener modelos digitales de superficies más precisos que generan a su vez cuencas visuales también más precisas para la elaboración del análisis visual de estudios de paisaje y de integración paisajística.

El análisis visual de la valoración del paisaje se realiza actualmente con programas informáticos de sistemas de información geográfica desde su aparición, los cuales incluyen para la realización del análisis visual herramientas para el cálculo de la cuenca visual basadas en de modelos digitales de elevación y varios puntos de observación.

En España cada vez más están surgiendo normativas autonómicas específicas que trasponen el Convenio Europeo de Paisaje con la incorporación de nuevos instrumentos de gestión, donde la realización del análisis visual adquiere cierta relevancia. En la actualidad las Comunidades Autónomas que cuentan con normativa específica en

materia de paisaje son la Comunitat Valenciana, Cataluña, País Vasco, Cantabria y la Región de Murcia. Los instrumentos de paisaje que se han establecido en España son los Estudios de paisaje y los Estudios de integración paisajística.

Esta investigación muestra cómo pueden utilizarse los datos LiDAR del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA) disponibles en el Centro nacional de descargas y los sistemas de información geográfica, para realizar el cálculo del análisis en la valoración del paisaje de forma más precisa, siendo éste el principal objetivo. Para ello se han probado varios métodos de interpolación para la obtención del modelo digital de superficie en el término municipal de Navajas.

En la realización de los estudios de paisaje de la Comunitat Valenciana para el análisis visual se están utilizando modelos digitales del terreno obtenidos a partir de las cotas y las curvas de nivel obtenidas del Instituto Cartográfico Valenciano (ICV) en formato digital con información tridimensional a escala 1:10.000 (Pérez Tacoronte, Llorens Cobos, García Botella & Requena Galipienso, 2008), que omiten frecuentemente los elementos verticales, no se incorpora la vegetación, ni las construcciones ni otros elementos del medio físico, obviando la realidad del paisaje. En muchos estudios se ha generado la cuenca visual con la ausencia de elementos importantes del paisaje que obstruyen la vista del observador.

En el desarrollo de la tesis, en primer lugar se recogen los antecedentes a partir de la documentación científica en el área de la investigación



referente a la creación modelos digitales de superficie a partir de datos LiDAR y sus aplicaciones en los análisis visuales.

En un apartado de la metodología se compara el resultado obtenido de los análisis visuales realizados actualmente a partir de un modelo digital del terreno y el resultado de un modelo digital de superficie para determinar las similitudes y diferencias entre ellos.

En la realización de la cuenca visual se puede encontrar actualmente gran diversidad de programas informáticos de sistemas de información geográfica. En esta investigación se lleva a cabo una comparación de la cuenca visual obtenida a partir de distintos programas SIG utilizados frecuentemente en España, tanto libres como comerciales, donde se establecen relaciones con los resultados obtenidos y se mide el tiempo de procesamiento en la generación de una cuenca visual.

En otro apartado se procede a una comparación del método de análisis visual incluido en el contenido de los estudios de paisaje de la Comunitat Valenciana a partir del modelo digital de superficie obtenido a partir de los datos LiDAR, de un modelo digital del terreno y un modelo digital de superficie urbana.

Finalmente, en el último apartado de la investigación se propone una metodología para la realización del análisis visual a nivel de proyecto con la utilización de una cuenca visual de identificación y del modelo digital de superficie obtenido, donde también se efectúa una comparación de los resultados con el modelo digital de superficie urbana.



## **2. OBJETIVOS**



## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivos generales**

Los objetivos de la tesis doctoral son identificar los diferentes tipos de análisis visuales en la valoración del paisaje a partir de cartografía, que pueden utilizarse actualmente y determinar la versatilidad e idoneidad del uso de la tecnología LiDAR para la obtención del análisis visual en la valoración del paisaje a nivel local/municipal y de proyecto en comparación con las técnicas actuales en uso.

### **2.2 Objetivos específicos**

- Analizar las metodologías actuales en la realización del análisis visual de la valoración del paisaje a partir de cartografía.
- Aplicar las herramientas SIG, a la nueva información cartográfica (datos LiDAR) capturados en el marco del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA).
- Determinar el modelo digital de superficie idóneo para obtener cuencas visuales a partir del análisis de diferentes métodos de interpolación, dentro del análisis visual de la valoración del paisaje.

- Analizar la similitud y el tiempo de procesado de las cuencas visuales generadas a partir de diferentes sistemas de información geográfica.
- Comparar estadísticamente el resultado del análisis visual de la valoración del paisaje efectuado a partir de un modelo digital de superficie, de un modelo digital del terreno y de un modelo digital del terreno con edificaciones. Como caso práctico se aplica al análisis visual realizado a partir de la metodología de la normativa paisajística de la Comunitat Valenciana.
- Proponer una metodología para la realización del análisis visual de estudios de integración paisajística a nivel de proyecto a partir de modelos digitales de superficie procedentes de datos LiDAR.

### **3. ANTECEDENTES**





### **3. ANTECEDENTES**

#### **3.1 La tecnología LiDAR ALS**

Según la plataforma en la que se haya instalado el sistema LiDAR puede ser dividido en láser escáner aerotransportado (ALS), láser escáner terrestre (TLS) y láser escáner móvil (MLS). En esta investigación se han utilizado los datos obtenidos a partir del láser escáner aéreo, que se describe a continuación.

ALS es un método de teledetección activa basada en la transmisión de un pulso de láser y detección de los siguientes pulsos, que se reflejan en un objeto. El principio básico del sistema para medir ópticamente superficies 3D desde el aire es la medición del tiempo de tránsito de la luz que permite el cálculo de la distancia entre el sensor y el reflector. A partir de la velocidad de la luz a través del aire (0,15 m por ns) se calcula fácilmente la distancia.

El sensor aerotransportado se compone del mecanismo de proyección y del láser, un Sistema Global de Posicionamiento (GPS) y una Unidad de Medida Interna (IMU), junto con un sistema de control que registra los datos. El GPS proporciona datos de localización, mientras que IMU registra el terreno y el balanceo del avión durante la toma de datos.

En conjunto, estas mediciones se utilizan para procesar los datos de ALS y para permitir la corrección del movimiento del avión y la

alineación de las coordenadas en la recogida de datos. Aunque los sistemas de suspensión en el aire eran capaces de registrar la altura de menos de 1 m de exactitud en la década de 1970, fueron los avances en la tecnología GPS y IMU los que permitieron que se utilizarán sensores para el mapeo topográfico (Beraldin *et al.*, 2010). Mientras que el escaneo láser es simple, en la práctica existen una serie de factores que deben tenerse en cuenta. El primero es la propagación del rayo láser a medida que se propaga a través de una lente. Esto hace que la divergencia del haz que afecta a la resolución espacial del sensor, (independientemente de la densidad de la muestra) determinando de ese modo el tamaño de la huella. La forma y la reflectividad de los materiales estudiados son también factores que afectan a las características de los datos ALS. El principio de la óptica activa de los sistemas de medición, tales como ALS es que la superficie es un reflector opaco (Beraldin *et al.*, 2010). Cuando se refleja con la vegetación, el sensor puede grabar múltiples retornos. Por lo general se registran de cuatro a seis ecos, hecho que permite la filtración de la vegetación del modelo de superficie.

El primer pulso recoge por lo general la vegetación y las construcciones, mientras que los pulsos posteriores son de las superficies por debajo de la cubierta de la vegetación. Además de las múltiples mediciones de pulsos, también se mide la intensidad de los impulsos devueltos. Diferentes superficies en el paisaje absorben/reflejan pulsos de manera diferente y, por tanto, puede utilizarse esta información en la clasificación de puntos (Sithole y Vosselman, 2004).

En el láser escáner aerotransportado (ALS), también llamado barrido láser aerotransportado, los pulsos del láser se utilizan para generar modelos digitales del terreno de alta precisión (MDT) con resoluciones horizontales y verticales a nivel de decímetro (Crutchley & Crow, 2010). Este grado de precisión hace posible la creación de imágenes que permiten la identificación visual de características muy sutiles de los movimientos de tierra. Una de las características más beneficiosas de la tecnología LiDAR es que es capaz de producir este tipo de imágenes, incluso bajo doseles forestales. Se distinguen dos tipos de sistemas LiDAR aerotransportados según la forma de recogida de los datos: sistemas de onda completa (*full waveform*) y sistemas de retornos discretos.

### **3.2 Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA)**

Los datos brutos LiDAR utilizados en esta investigación corresponden a los capturados en el marco del Plan Nacional de Ortofotografía, LiDAR-PNOA cedidos por el Instituto Geográfico Nacional. Los usos de estos productos de datos geográficos digitales tienen carácter libre y gratuito, según la Orden FOM/2807/2015, de 18 de diciembre, por la que se aprueba la política de difusión pública de la información geográfica generada por la Dirección General del Instituto Geográfico Nacional, siempre que se mencione el origen y propiedad de los datos con el alcance y forma que autorice la licencia de uso correspondiente.

El objetivo del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea es la obtención de ortofotografías aéreas digitales con resolución de 25 o 50 cm y modelos digitales de elevaciones (MDE) de alta precisión obtenidos por tecnología LiDAR de todo el territorio español a partir del año 2009, con un periodo de actualización de 2 o 3 años. Se trata de un proyecto cooperativo y cofinanciado entre la Administración General del Estado y las Comunidades Autónomas. Los modelos digitales de elevación obtenidos forman parte de los datos básicos de referencia recogidos en la Directiva 2007/2/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 14 de marzo de 2007 por la que se establece una Infraestructura de Información Espacial en la Comunidad Europea (INSPIRE).

Los datos LiDAR del PNOA están siendo aplicados actualmente en la cartografía de zonas inundables (García Martínez, Ojeda & Villa, 2010), en la cartografía de vegetación (Morán, 2013), en la clasificación digital de zonas forestales (Ferreiro, Barreiro & Miranda, 2013), en el seguimiento ecológico (Red de Parques Nacionales, 2014), en la estimación de variables dasométricas (Cabrera, Lamelas, Montealegre & Riva, 2014), en el modelado de variables de combustibles de copa de árboles (González-Ferreiro *et al.*, 2014), en la estimación de pérdidas de biomasa (Ruiz, Gracia, Gracia & Fernández, 2016), en la detección de tejados energéticamente eficientes (Santamaría-Peña, Sanz-Adán, Martínez-Rubio & Valbuena-Rabadán, 2015) y en la localización de yacimientos arqueológicos (García *et al.*, 2016).

### 3.3 Tipos de análisis visual

En este apartado se recopilan los diferentes tipos de análisis visuales obtenidos en la revisión bibliográfica de esta investigación, los cuales pueden usarse para el análisis visual de la valoración del paisaje.

#### 3.3.1 Cuenca visual

Una cuenca visual (*viewshed*, en inglés) se define como el área de tierra que es visible para el ojo humano desde un punto de observación fijo como puede verse en la Figura 1 (Travis, Elsner, Iverson, Johnson & otros, 1975).

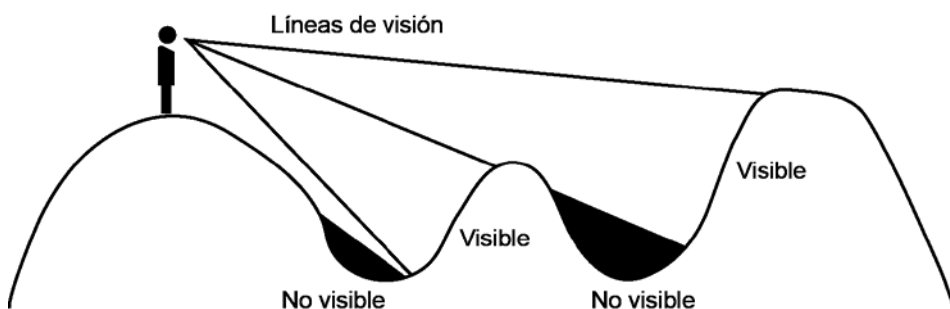


Figura 1. Cuenca visual

El análisis de la cuenca visual es una herramienta muy común en programas de sistemas de información geográfica (SIG). A partir de una o múltiples líneas de visión (LOS) se calcula la cuenca visual. La línea de visión es una línea vectorial que se extiende desde un lugar de

observación a una celda de la cuadrícula e indica la visibilidad de una celda de la trama.

La operación cuenca visual utiliza como datos de entrada un ráster o un TIN (*Triangulated Irregular Network*). En un modelo ráster cualquier punto dentro de una celda de la cuadrícula se le asigna un único valor de elevación a pesar de los posibles cambios en la elevación que puedan existir dentro de esa celda, esta es una limitación potencialmente significativa del modelo basado en un ráster (Dean, 1997; Lee, 1991). En un TIN una superficie se representa mediante triángulos con vértices en los puntos de datos muestreados (Peucker, Fowler, Little & Mark, 1978).

El resultado determina todos los lugares visibles a partir de uno o más puntos de vista específicos sobre la superficie. El resultado, en un sistema basado en una malla, está formado por una cuadrícula en la que a las celdas visibles se les da el valor 1 y a las celdas no visibles se le da el valor 0. En un sistema basado en vectores, la salida es un conjunto de nuevos polígonos que delimitan las áreas visibles.

En el modelo se pueden incluir las obstrucciones tales como árboles y construcciones que afectan al observador desde el punto de observación. La principal deficiencia del análisis cuenca visual es la precisión de la cuenca visual resultante (Fisher, 1991). Pueden existir errores en el modelo digital del terreno (MDT) para calcular la cuenca visual.

En las regiones rurales la superficie del terreno se considera que juega un papel más importante en la determinación de intervisibilidad y la cuenca visual, y frecuentemente se han utilizado para determinar lo que es visible desde un punto de observación mediante el cálculo de las celdas de un modelo de elevación que son visibles para un observador (Tandy, 1967, Lynch, 1976), usando para ello el algoritmo de línea de visión Fisher (1993).

Los principales errores en la realización de la cuenca visual por medio de un sistema de información geográfica son los siguientes:

- Errores inherentes en los modelos digitales del terreno (MDE) así como los errores introducidos durante el proceso de captura de los datos.
- Diferencias en los modelos de datos como MDE y TIN.
- Resolución digital y datos análogos, si los contornos (isolíneas) han sido capturados de mapas cartográficos o de fotografías aéreas a partir de fotogrametría.
- Los algoritmos en los programas informáticos en la realización de la cuenca visual.
- La presencia en la superficie de objetos como construcciones y árboles.
- El efecto de los bordes.

La mayor fuente de error en la generación de la cuenca visual es el error en la base de datos original utilizada para crear la malla ráster en la que se basa la cuenca visual (Riggs y Dean, 2007).

El análisis de la cuenca visual se utiliza en una amplia gama de aplicaciones, incluyendo la localización de torres de retransmisión de telecomunicaciones (Floriani, Marzano & Puppo, 1994), la localización de aerogeneradores (Kidner, Sparkes & Dorey, 1999), la protección de especies en peligro de extinción (Press, Camp, Sinton & Knight, 2013), la prevención de incendios forestales (Klein & Cova, 2014; Pompa-García, Solís-Moreno, Rodríguez-Téllez & Pinedo-Álvarez, 2010; Pompa-García, Zapata-Molina, Hernández-Díaz & Rodríguez-Téllez, 2012), el análisis de yacimientos arqueológicos (M. W. Lake & Woodman, 1998), la evaluación de la planificación del medio ambiente urbano (Lake, Lovett, Bateman & Langford, 1998), la selección de sitios para granjas acuícolas (Depellegrin, 2016; Falconer, Hunter, Telfer & Ross, 2013), y la planificación óptima de la ruta de un camino (Stucky & Lee, 1998).



### 3.3.1.1 Tipos de cuenca visual

En la actualidad se han encontrado nueve variantes del análisis visual de la cuenca visual, que se enumeran a continuación:

- Cuenca visual simple / *single viewshed*
- Cuenca visual / *multiple multiple viewshed*
- Cuenca visual acumulada / *cumulative viewshed*
- Cuenca visual total / *total viewshed*
- Cuenca visual inversa / *reverse viewshed*
- Cuenca visual probable / *probable viewshed*
- Cuenca visual de identificación / *identifying viewshed*
- Cuenca visual difusa / *fuzzy viewshed*
- Cuenca visual de Higuchi / *Higuchi viewshed*
- Cuenca visual de los horizontes / *horizon viewshed*

#### 3.3.1.1.1 Cuenca visual simple

La cuenca visual simple “*single viewshed*” se realiza a partir de un único lugar de observación. La ubicación puede ser un punto, una línea o un polígono, los cuales pueden ser en formato vectorial o un conjunto de celdas en formato ráster. Los programas de información geográfica poseen una herramienta para poder calcular la cuenca visual simple (Conolly & Lake, 2006).

### **3.3.1.1.2 Cuenca visual múltiple**

Una cuenca visual múltiple “*multiple viewshed*” se elabora a partir de la unión de las cuencas individuales de cada sitio. En un sistema de este vector implica disolver los límites innecesarios del polígono y el cálculo de la estructura de los polígonos que delimitan el área visible total a partir de todos los puntos de observación. Es en definitiva un sistema de malla que consiste en realizar la unión de las celdas de cada cuenca visual individual. En algunos sistemas ráster se pueden combinar de forma automática en una sola operación (Andresen & Madsen, 1993).

La cuenca visual múltiple muestra la visibilidad de un número de sitios o lugares por la unión de varias cuencas visuales. Se realiza la cuenca de cada lugar para generar una sola cuenca visual binaria y calcular a partir de ella la unión. En la cuadrícula resultante, las celdas visibles desde al menos un sitio tienen el valor 1, mientras que las celdas que no son visibles desde ningún sitio tienen el valor 0 (Wheatley & Gillings, 2002).

#### **3.3.1.1.3 Cuenca visual acumulada**

El término cuenca visual acumulada fue ideado por Wheatley para examinar la relación visual entre múltiples lugares o sitios (Wheatley, 1995). Este tipo cuenca visual es una herramienta útil para calcular la intervisibilidad entre dos sitios.

En las situaciones donde la intervisibilidad dentro de un grupo de sitios es de interés, es posible obtener un mapa de cuenca visual para cada ubicación del sitio. Estos mapas individuales se unifican para crear un único mapa. Este mapa representa, para cada celda dentro del paisaje, el número de sitios de la línea de visión de esa celda. Para una muestra de  $N$  sitios, el valor de esta superficie, obviamente, constará de números enteros que variarán entre 0 y  $N$ . El mapa obtenido se denomina mapa cuenca visual acumulada en la zona analizada. El concepto de cuenca visual acumulada se utilizó para distinguir este resultado con el de cuenca visual múltiple mencionado por Ruggles, Medyckyj-Scott y Gruffydd (1993) definida como la unión lógica de una serie de mapas individuales de cuencas visuales.

#### **3.3.1.1.4 Cuenca visual total**

Las cuencas visuales totales "*total viewshed*" se obtienen del mismo modo que la cuenca visual acumulativa excepto que se contemplan todas las ubicaciones. Stucky y Lee (1998) distinguen dos tipos de

cuenca visual total basada en la ubicación del punto de observación o el objetivo.

La cuenca visual total puede calcularse en función de la posición de cada punto de observación y el radio utilizado para la cuenca visual, representada como una trama adicional o campo escalar. La cuenca visual total proporciona una descripción de la estructura visual de la totalidad del terreno (Llobera, 2003a).

#### **3.3.1.1.5 Cuenca visual inversa**

El análisis de cuenca visual inversa “*reverse viewshed*” sigue los mismos principios que el análisis de cuenca visual. Sin embargo, se usa para determinar la visibilidad desde punto objetivo determinado a varios puntos de observación (Fisher, 1996). Fisher (1996) distingue entre el área que se puede ver desde la ubicación (cuenca visual) y el área de la cual una ubicación se puede ver (cuenca visual inversa), basada en las diferencias de altura entre el punto de visión y el objeto visto.

La cuenca visual inversa muestra la zona del paisaje de un emplazamiento que es visible. En la práctica, se realiza una única cuenca visual calculada a partir del punto del objetivo y se analizan los puntos de observación si en su ubicación son visibles o no. En este caso hay que considerar la altura de los ojos en los puntos de observación. El cálculo de la cuenca visual inversa se realiza para

evaluar el impacto visual de un parque eólico (Ralling, Kidner & Ware, 1999).

#### **3.3.1.1.6 Cuenca visual probable**

El concepto de cuenca visual probable "*probable viewshed*" fue desarrollado por Fisher, quien la consideró erróneamente como una "cuenca visual difusa" (Fisher, 1992). En una cuenca visual probable se genera una superficie de probabilidad en la que cada celda expresa el valor de la probabilidad de pertenencia a la cuenca visual, es decir, la probabilidad con la que es visible (Wheatley & Gillings, 2002). Posteriormente.

La probabilidad de que una celda sea visible depende de la precisión del modelo de elevación digital. Para calcular esta probabilidad uno tiene que tener varios modelos diferentes de elevación de la misma área de estudio. Fisher genera este modelo mediante la simulación de errores aleatorios en el modelo digital de elevaciones basado en la simulación de Monte Carlo (Fisher, 1994). Varias simulaciones proporcionan varias cuencas visuales del área estudiada. Con los valores de las cuencas visuales obtenidas se realiza la suma de estos y se obtiene el valor de la celda de la cuenca visual probable, siendo el número de veces que la celda se ve en el paisaje con diferentes alturas y errores. A partir de aquí, se puede crear un índice: el número de veces que una celda forma parte de una cuenca visual. Este índice es un número entre 0 y 1 que expresa la probabilidad de que una celda

pertenezca a una cuenca visual (Fisher, 1992). La cuenca visual probable ofrece una visión más diferenciada de las cuencas visuales anteriores. Por otra parte, el impacto de los posibles errores en el modelo digital de elevaciones es menor debido a que utilizan aquí varios modelos de elevación simulados (Fisher, 1992).

### **3.3.1.1.7 Cuenca visual de identificación**

Danese, Nolè y Murgante (2011) desarrollaron el concepto de cuenca visual denominado cuenca visual de identificación "*identifying viewshed*", la cual es posible entender en un mapa sintético cuales y cuántos puntos de referencia se ven desde cada punto del territorio, en lugar de tener diferentes mapas, difíciles de consultar y analizar al mismo tiempo.

Para obtener el mapa de la cuenca visual de identificación considerando N mapas cuencas visuales binarios  $V_i$ , calculado respectivamente para cada punto de observación, el mapa  $I$  se puede obtener aplicándola siguiente expresión:

$$I = \sum_{i=1}^n V_i \cdot 10^{i-1} \quad \text{Ecuación 1}$$

Como ejemplo, si se tiene tres matrices A, B, C, cada una correspondiente a tres mapas de cuencas visuales, el mapa de identificación puede obtenerse combinando los mapas simples de

cuencas visuales binarias de acuerdo con la ecuación anterior. Por lo que en cada píxel del mapa no habrá un número binario, sino que estará formado por 3 dígitos, cada uno representando la capacidad de ver un punto de observación; lo que permite entender que un punto es visible (dígitos igual a 1) y que no es (dígitos igual a 0).

Obviamente, el problema puede ser invertido, ya que el mapa de identificación no sólo muestra qué puntos son visibles desde cada píxel, sino también que los puntos pueden ser vistos desde cada píxel. Esto significa que, teniendo en cuenta de nuevo el píxel resaltado, el punto B no sólo puede ver el píxel, sino que también puede ser visto desde él; del mismo modo los puntos A y C no pueden verse y no pueden ser vistos desde el píxel.

#### **3.3.1.1.8 Cuenca visual difusa**

La cuenca visual difusa "*fuzzy viewshed*" registra el grado en el que un objeto en el lugar de destino puede ser distinguido, considerando fenómenos como las condiciones atmosféricas (neblina, niebla, etc.), la visión del observador, el contraste del objeto-fondo, etc. por lo que, la incertidumbre de percepción da lugar a la cuenca visual difusa. (Fisher, 1994).

La capacidad de distinguir un elemento se reduce con un aumento de la distancia de visualización (Wheatley & Gillings, 2002). En una cuenca visual difusa todas las celdas de la cuenca visual obtienen valores, entre

0 y 1, que están en proporción a la distancia de visualización; las celdas más cercanas al punto de observación estarán más próximas al valor 1, pero cuanto más lejos están de la ubicación de origen, su valor se aproximará más a 0. Las celdas que no son visibles tienen un valor de 0 (Fisher, 1994).

Fisher distinguió cuatro factores que también afectan a la capacidad de diferenciar un objeto (Fisher, 1994):

El tamaño y el color del objeto

El color de la vegetación circundante

La visión del observador y el conocimiento de que él (o no)

tienen sobre el objeto

Las condiciones meteorológicas en el momento de la observación

La gran ventaja de la cuenca visual difusa se debe a que tiene en cuenta una visibilidad limitada o reducida a una distancia de visualización. Debido a que se tiene en cuenta la acción de la niebla, el sol brillante y la neblina atmosférica que tener en cuenta, esta cuenca visual estrechamente está relacionada con la situación de la observación real.

#### **3.3.1.1.9 Cuenca visual Higuchi**

Fraser (1983) en el estudio de monumentos prehistóricos ofreció una serie de clases a distancia que podrían usarse para descomponer un



campo de visión en bandas relacionadas con el empeoramiento de la claridad visual con la distancia.

Wheatley y Gillings (2000) continuaron trabajando sobre la investigación de Fraser que en 1983 identificó tres clases de distancia en relación con la exposición. En contraste con Fraser fueron capaces de capturar unos límites de clases objetivas que son útiles en una serie de paisajes. Lo hicieron al confiar en el trabajo del planificador de paisaje Tadahiko Higuchi y así desarrollaron el concepto de la cuenca visual Higuchi (Wheatley & Gillings, 2000). Estos límites objetivos se generan utilizando un objeto estándar, en este caso, una de las especies de árboles más comunes en el paisaje para así distinguir tres clases de distancia (Wheatley & Gillings, 2000):

- Poca distancia: en esta clase puede distinguir los árboles individuales y uno puede experimentar los sonidos y los olores (por ejemplo, el sonido del viento). El límite de esta clase es aproximadamente 60 veces la longitud de las especies de árboles más comunes.
- Media: en la clase media, sólo son visualmente perceptibles las copas de los árboles, y uno puede ver que ya no son entidades separadas. Esta clase es hasta 1100 veces la longitud de las especies dominantes.
- A lo lejos, desde esta área uno sólo puede decir que es cubierto, no se experimenta sensación de más profundidad.

La cuenca visual Higuchi se genera según Wheatley y Gillings (2000) en cuatro fases:

- Calcular una sola cuenca visual binaria desde el punto de observación
- Calcular una capa de distancia desde el punto de observación. En un SIG ráster, en la celda se pone esta distancia como un valor
- Reclasificación de la capa a distancia de acuerdo con los criterios de clase Higuchi (determinado por la altura del árbol típico de la zona y el periodo en estudio)
- Superposición de la cuenca visual binaria sobre la capa distancia para extraer el rango de los valores de la distancia que caen dentro de la zona en la visión

El resultado es una cuenca visual en el que todas las ubicaciones visibles se dividen radialmente en una de tres clases. Con la cuenca visual Higuchi no sólo se obtienen lugares visibles por un observador, sino que también se pueden experimentar con otros sentidos, y con objetos que todavía pueden reconocerse como entidades separadas, y desde la que se observa con menos profundidad.

#### **3.3.1.1.10 Cuenca visual de los horizontes**

Fisher (1996) creó el término de cuenca visual de los horizontes "*horizons viewshed*" para mostrar la variación de los horizontes de la

cuenca visual, con este tipo de cuenca visual se obtienen una categorización de cuatro vías de la zona visible.

La cuenca visual de los horizontes ha sido utilizada recientemente por Fontani (2016) para determinar el impacto visual de una línea de alta tensión en el área próxima al Castillo de Nozzano (Italia).

### **3.3.2 Intervisibilidad**

La intervisibilidad se define como el número de veces que cada ubicación es vista por todas las localizaciones de la superficie. El análisis de la intervisibilidad requiere la extensión de las líneas de visión de cada celda a todas las celdas en el modelo digital de elevaciones y un número de cálculos trigonométricos para determinar si una línea de visión recta existe entre el punto de observación y la celda objetivo (Mills, Fox y Heimbach, 1992).

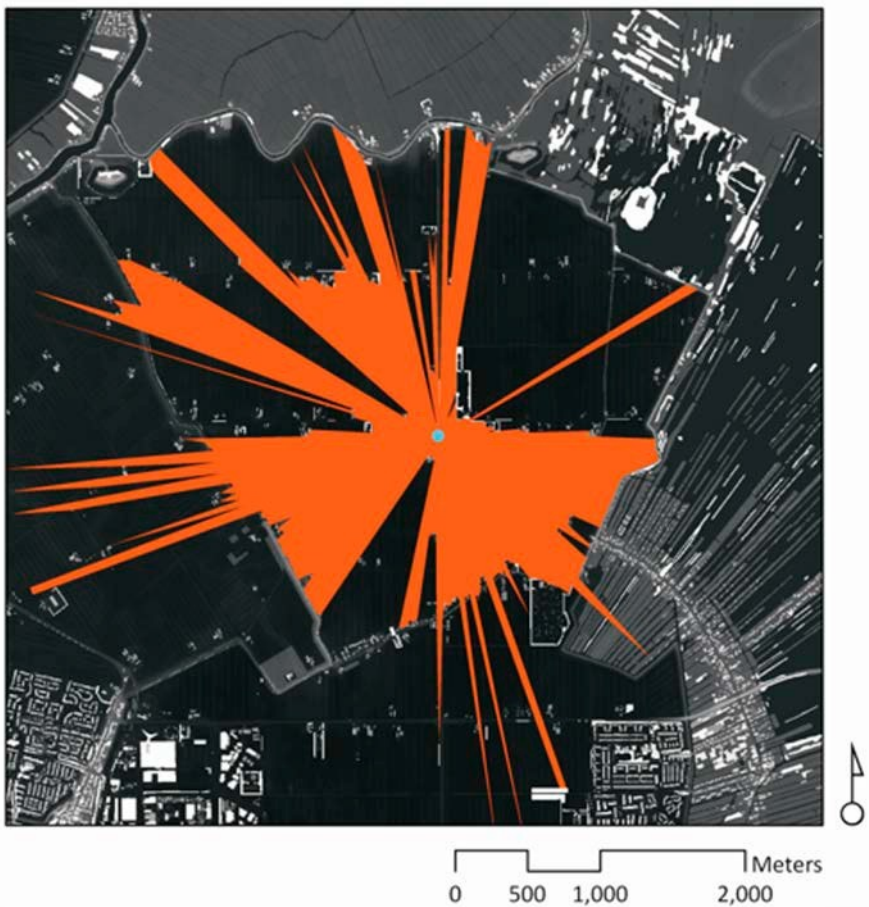
Felicísimo (1999) define la intervisibilidad cuando dos puntos son mutuamente visibles si el segmento rectilíneo que los une o línea visual tiene siempre una altitud superior a la del terreno sobre su proyección. La intervisibilidad es un concepto que sostiene que es probable que los observadores y objetivos sean mutuamente visibles (Lonergan, Hedley & Clague, 2015). Asimismo, la relación de intervisibilidad no siempre es recíproca, puesto que algunos factores, como la diferencia de altitud la diferente iluminación, especialmente el efecto de contraluz, puede hacer

que un punto sea visible desde otro, pero no a la inversa (Zamora Merchán, 2006).

### **3.3.3 Isovista**

Benedikt (1979) describe la isovista (*isovist*, en inglés) como el conjunto de todos los puntos visibles desde un punto de observación dado en el espacio. En su investigación realizó un conjunto de mediciones analíticas de las propiedades de la isovista aplicadas en el logro de descripciones cuantitativas de ambientes especiales, tales como el área y el perímetro. Benedikt comienza considerando el volumen visible desde una ubicación, y posteriormente simplifica la representación realizada tomando una sección horizontal a través del poliedro de la sección. El resultado de las isovistas obtenidas son siempre polígonos individuales sin agujeros.

Según Llobera (2003), en otros estudios diferentes a los arquitectónicos y urbanos, el término cuenca visual tiende a ser utilizado en lugar de isovista. Mientras que Weitkamp (2011) diferencia estos dos conceptos semánticamente, una diferencia típica entre los dos conceptos es que la isovista representa el espacio que puede ser 'entre-visto', mientras que la cuenca visual representa (partes de) los objetos que son visibles.



**Figura 2.** Isovista (Proporcionada por Weitkamp)

La isovista se emplea frecuentemente en entornos construidos, particularmente en estudios arquitectónicos (Benedikt, 1979). Una isovista calcula el subconjunto de puntos que son visibles de un punto particular panorámico que pueden ser generalizado en un gráfico de 2 dimensiones o un poliedro de 3D (Llobera, 2003a).

Estudios más recientes han desarrollado la teoría de la isovista 3D (Morello y Ratti, 2009), donde a partir de un modelo digital de elevaciones (MDE) considera la forma de las edificaciones y de la topografía.

Morello y Ratti (2009) definen la isovista 3D como el campo de vista 3D que se puede ver desde un mirador con una rotación circular de 360° y desde el suelo hasta el cielo. En comparación con la definición de una isovista 2D, que considera un plano paralelo al suelo, esta nueva definición se refiere a los volúmenes reales percibidos en un espacio 3D. La adición de la dimensión vertical ayuda a simular mejor el entorno físico observado desde el punto de observación.

Para medir el espacio visible calculado para la isovista puede utilizarse el programa ArcGIS junto a la extensión Isovist Analyst desarrollada por Rana (2002).

### **3.3.4 Viewsphere**

Yang, Putra y Li, (2007) definen “*viewsphere*” como el análisis de visibilidad 3D mediante el cálculo del "volumen" visible que está rellenado por el conjunto óptico ambiental se construye desde la vista desde un punto de observación específico a los puntos de obstrucción del medio ambiente de los alrededores a través de “la digitalización” de la línea visual o línea de visión.

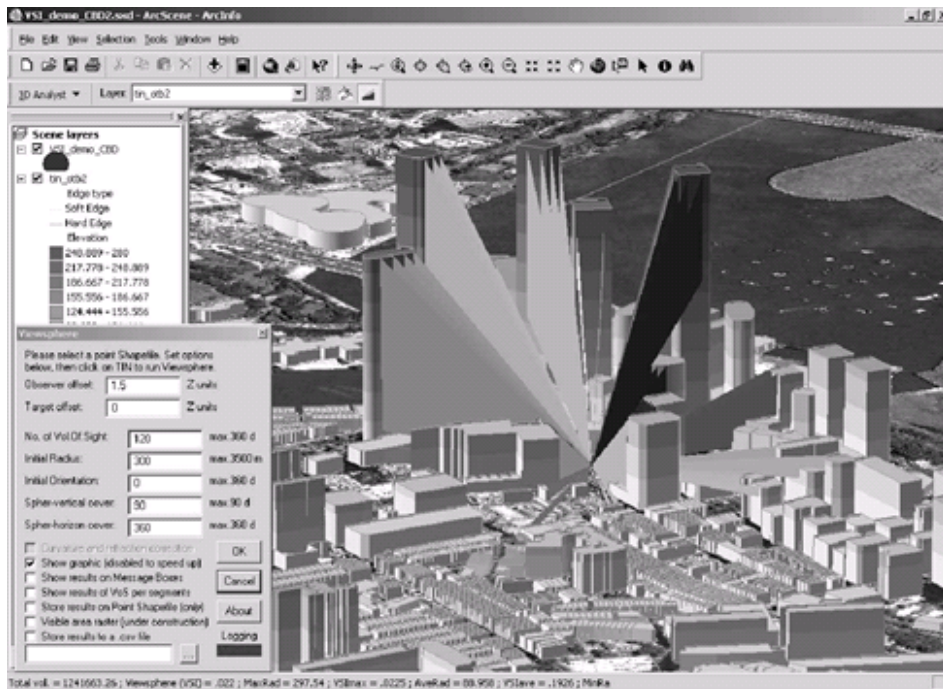
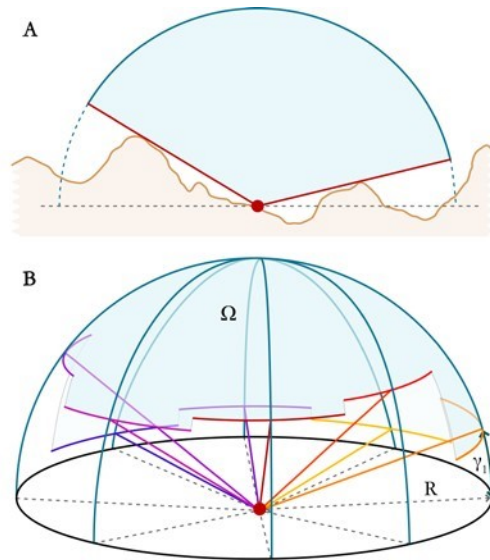


Figura 3. Viewsphere (Proporcionada por Putra)

### 3.3.5 Factor Sky-view

El factor *Sky-view* es la parte visible del cielo despejado por el relieve, se puede utilizar para hacer como si el relieve topográfico estuviera iluminado difusamente con el fin de visualizar con claridad las características de la altura relativa. El factor de *Sky-view* usa la apertura como un indicador para la iluminación uniforme difusa (Zakšek, Oštir & Kokalj, 2011).



**Figura 4.** Factor Sky-view (Proporcionada por Žiga Kokalj)

El factor *Sky-view* ha sido ampliamente utilizado para medir el cielo visible con el fin de determinar la radiación solar (Gál, Lindberg & Unger, 2009; Grimmond, 2007; Unger, 2009). También se aplica actualmente como técnica de visualización de lugares arqueológicos (Bennett, 2011; Frangipane, 2010; Kokalj, Zakšek & Oštir, 2011).

### 3.3.6 Magnitud visual

Iverson, (1985) define la parte del campo de visión ocupada por un objeto como magnitud visual "*visual magnitude*", también conocida como umbral visual "*visual threshold*".



La magnitud visual se define como el recuento para cada celda de un ráster en la superficie de identificación como la cantidad de veces que puede verse una celda por un usuario en un tramo determinado (Llobera, 2003b).

La magnitud visual se ha usado como un indicador de la interconexión de las cuencas visuales en caminos (Lindsey *et al.*, 2008; Wilson, Lindsey & Liu, 2008), en la interconexión de cuencas visuales de aerogeneradores (Bishop & Miller, 2007), en las variaciones de visibilidad ocasionadas a causa del cambio de ocupación del suelo (Grêt-Regamey, Bishop & Bebi, 2007) y en la evaluación de la visibilidad de un tramo de la ruta turística de la Reserva de la Biosfera de la UNESCO de Clayoquot Sound ubicada en la Isla de Vancouver, Columbia Británica, Canadá (Chamberlain & Meitner, 2013).

### **3.3.7 Apertura visual**

La apertura visual “*visual openness*” es una métrica de una zona o porcentaje de área visible total dentro de los límites de la cuenca visual (Fisher-Gewirtzman & Wagner, 2003). La apertura visual se usa para indicar como es de extensiva la vista en un segmento de un camino de peatones urbanos (J. Wilson *et al.*, 2008),

La apertura visual se define como indican estos tres índices (Shach-Pinsly, Fisher-Gewirtzman & Burt, 2011):

- La longitud medida de fachadas en las que se puede observar el punto de vista.
- El área medida de fachadas construidas a partir de la cual se pueda observar la vista.
- La zona de paisaje medida que se está viendo en la calle y en cada planta construida.

### **3.4 La cuenca visual en los sistemas de información geográfica SIG.**

El análisis de la cuenca visual a partir de un sistema de información geográfica (SIG) se basa en el uso de un modelo digital del terreno (MDT) en formato ráster, donde el cálculo define qué celdas del ráster son visibles desde la celda que constituye el punto de observación específico y dentro del perímetro de visión máxima establecido. Después de definir el punto de origen del observador, el algoritmo calcula un nuevo mapa ráster binario en el que las celdas de valor 1 son visibles desde el punto de observación mientras que las celdas con valor 0 no son visibles (Wheatley & Gillings, 2002). Las cuencas visuales suelen ser irregulares y fragmentadas, en lugar de una sola área delimitada continua o polígono. Fisher (1993) fue el primero en analizar la conveniencia y la variabilidad de los métodos de cálculo de la cuenca visual.

Steinitz (1974) desarrolló un programa para el modelo de calidad visual en la Escuela de Diseño de Harvard. El programa divide el área que rodea cada cuadrícula en ocho octantes para calcular la cuenca visual, donde se puede seleccionar los octantes y el número de rayos, así como con un alcance diferente.

Travis, Elsner, Iverson, Johnson, *et al.* (1975) crearon el programa VIEWIT para calcular cuencas visuales mediante rayos, con posibilidad de cartografía automática; permite conocer el número de veces que es visto un punto desde cualquier lugar del paisaje concreto. Se basaba en el principio de la intervisibilidad, con el que se podían generar mapas de visibilidad a partir de varios puntos de vista, tablas de tiempo de exposición y cálculos de magnitud visual.

Aylward y Turnbull (1977) desarrollaron el programa VIEW Suite para calcular la visibilidad potencial de un desarrollo bajo una serie de condiciones, donde se define el tamaño de la zona de influencia visual usando un método de cálculo por rayo e interpolación

Paulson (1978) creó un programa para dibujar mapas de visibilidad desde el análisis del terreno con el fin de proporcionar a los gestores de recursos visuales información visual a bajo coste.

Aguiló (1983) desarrolló una metodología para la evaluación de la fragilidad visual del paisaje. Estudia y clasifica las cuencas visuales según la forma que tienen, de las que obtiene unos índices que

permiten un análisis comparativo y una mejor comprensión del paisaje según la visibilidad.

Tévar (1996) desarrolló un programa donde el método para calcular la cuenca visual consiste en trazar rayos visuales al igual que se hace en el método de los rayos, pero con la diferencia en este caso de que tanto el ángulo de separación entre los rayos visuales como el paso para cada rayo, son variables y no se definen a priori.

A finales del siglo pasado la mayoría de los programas informáticos de sistemas de información geográfica proporcionan herramientas para el análisis visual. Estas herramientas generalmente utilizan un MDE y aplican las funciones estándar que crean un mapa binario de la cuenca visual. El MDE se utiliza de una manera determinista y con posibles inexactitudes y su impacto en los resultados finales son a menudo ignorados (Nackaerts, Govers & Orshoven, 1999). Más adelante en esta investigación se utilizan algunos de los programas SIG disponibles actualmente en el cálculo de la cuenca visual.

### **3.5 Normativa de paisaje**

#### **3.5.1 El Convenio Europeo del Paisaje**

La protección del paisaje en Europa surgió a mediados de 1990, con la elaboración del Convenio Europeo del Paisaje (CEP) por el Consejo de Europa y se concluyó en el año 2000 en la ciudad de Florencia.

El propósito general del Convenio es animar a las autoridades públicas a adoptar políticas y medidas a escala local, regional, nacional e internacional para proteger, planificar y gestionar los paisajes europeos con vistas a conservar y mejorar su calidad y llevar al público, a las instituciones y a las autoridades locales y regionales a reconocer el valor y la importancia del paisaje y a tomar parte en las decisiones públicas relativas al mismo.

El Convenio Europeo del Paisaje (CEP) define al paisaje como cualquier parte del territorio tal como la percibe la población, cuyo carácter es el resultado de la acción y la interacción de factores naturales o humanos.

### **3.5.2 La legislación de paisaje en España y en las Comunidades Autónomas**

España firmó el Convenio Europeo del Paisaje (CEP) en octubre de 2000, y fue ratificado 7 años más tarde, el 26 de noviembre de 2007. España no ha desarrollado ninguna normativa a nivel estatal hasta el momento para dotarse de los instrumentos necesarios para garantizar la protección del paisaje, la gestión y la planificación.

Las comunidades autónomas de Cataluña, la Comunitat Valenciana, Galicia, Cantabria y País Vasco han desarrollado normativas específicas en materia de paisaje donde han adoptado las medidas previstas por la Convención.

La primera comunidad autónoma de España en realizar una legislación en materia de paisaje según el Convenio Europeo del Paisaje fue la Comunitat Valenciana en una ley aprobada en 2004, la Ley 4/2004 del 30 de junio, de la Generalitat, de Ordenación del Territorio y Protección del Paisaje que incorpora aspectos tanto de paisaje y ordenación del territorio como del decreto que la desarrolla, Decreto 120 del 11 de agosto del 2006, del Consell, por el que se aprueba el Reglamento de Paisaje de la Comunidad Valenciana. Un año después, en 2005, Cataluña realizó su ley de paisaje, Ley 8/2005 del 8 de junio, de Protección, Gestión y Ordenación del Paisaje, y también con el Decreto 343 del 2006, por el que se desarrolla la Ley 8 del 8 de junio del 2005, de Protección, Gestión y Ordenación del Paisaje, y se regulan los estudios e informes de impacto e integración paisajística. En el año 2008 Galicia publicó Ley 7/2008 del 7 de julio, de Protección del Paisaje de Galicia. La comunidad autónoma de Cantabria en julio de 2014 aprobó la Ley 4/2014, de 22 de diciembre, del Paisaje. La última comunidad autónoma que ha realizado una ley de paisaje es Murcia en la Ley 13/2015, de 30 de marzo, de ordenación territorial y urbanística de la Región de Murcia, aunque en su nombre no hace referencia al paisaje en su contenido sí establece medidas de gestión del paisaje.

En la Ley 4 del 2004 de la Comunitat Valenciana en el contenido de los estudios del paisaje y de integración paisajística, se incluye un análisis visual del que se deriva una identificación y valoración de impactos visuales. En las guías metodológicas editadas por las comunidades autónomas de Galicia y Cataluña para la elaboración de los documentos procedimentales, la concreción no es mayor. En ambos casos se hace

referencia a la visibilidad referida a las cuencas visuales (Mínguez y Álvarez, 2015).

La Ley 4/2004 del 30 de junio, de la Generalitat, de Ordenación del Territorio y Protección del Paisaje y su decreto han sido derogados en 2014 por la ley 5/2014, de 25 de julio, de la Generalitat, de Ordenación del Territorio, Urbanismo y Paisaje, donde el análisis visual objeto de esta investigación no ha tenido modificaciones a la hora de su realización.

### **3.5.2.1 Instrumentos de gestión del paisaje en la normativa de paisaje de las Comunidades Autónomas**

A continuación, se recogen los instrumentos de paisaje de las Comunidades Autónomas de España, donde se detallan aquellos en los que es necesario la elaboración de un análisis visual según su contenido.

#### **3.5.2.1.1 Cantabria**

En Ley 4/2014, de 22 de diciembre, del Paisaje de Cantabria existen dos instrumentos de paisaje, los Estudios de paisaje, los Proyectos de Actuación Paisajística y los Análisis de Impacto e Integración Paisajística. Estos últimos equivaldrían a los que en otras Comunidades se definen como Estudios de integración paisajística, y donde en los

Estudios de paisaje se incluye la realización de un análisis de la visibilidad.

#### **3.5.2.1.2 *Cataluña***

En ley de paisaje, Ley 8/2005 del 8 de junio, de Protección, Gestión y Ordenación del Paisaje se incluyen los Catálogos de paisaje, mientras que en el Decreto 343 del 2006, por el que se desarrolla la Ley 8 del 8 de junio del 2005, de Protección, Gestión y Ordenación del Paisaje se regula los estudios e informes de impacto e integración paisajística. En el Decreto se incluye las visibilidades como factor para determinar las unidades de paisaje de los catálogos de paisaje y la visibilidad en el contenido de los estudios de integración paisajística como punto de la descripción del medio físico.

#### **3.5.2.1.3 *Comunitat Valenciana***

En Ley 5/2014, de 25 de julio, de la Generalitat, de Ordenación del Territorio, Urbanismo y Paisaje los instrumentos de paisaje son los estudios de paisaje, los estudios de integración paisajística y los catálogos de paisaje.

#### **3.5.2.1.4 *País Vasco***

En el Decreto 90/2014, de 3 de junio, sobre protección, gestión y ordenación del paisaje en la ordenación del territorio de la Comunidad



Autónoma del País Vasco los instrumentos de paisaje son los catálogos del paisaje, las determinaciones del paisaje, los planes de acción del paisaje y los estudios de integración paisajística. De los cuales los Catálogos del paisaje incluirán en su contenido la identificación, delimitación y caracterización y valoración de las cuencas visuales y de las texturas paisajísticas presentes en cada área funcional, entendidas respectivamente como las unidades territoriales relativamente homogéneas utilizando criterios de visibilidad, y en los Estudios de integración paisajística la visibilidad del paisaje.

#### **3.5.2.1.5 Murcia**

En Ley 13/2015, de 30 de marzo, de ordenación territorial y urbanística de la Región de Murcia se incluye un único instrumento de paisaje, el estudio de paisaje. Este estudio de paisaje contiene la realización de un análisis de la visibilidad y de los principales elementos constituyentes del paisaje tales como relieve, vegetación, infraestructuras y asentamientos residenciales y productivos.

### **3.6 Métodos de valoración del paisaje**

Existen varios métodos de valoración del paisaje; en España se han utilizado ampliamente los establecidos por Aguilo y Blanco (1981), y en ellos se distinguen tres métodos: métodos directos, métodos indirectos y métodos mixtos.

#### **3.6.1 Métodos directos**

En este tipo de métodos el paisaje se valora directamente, de modo subjetivo, sin desagregarlo en componentes o categorías estéticas, donde se asume la subjetividad para medir la calidad visual del paisaje. La evaluación se realiza por medio de la contemplación del paisaje en campo o por fotografías, películas, etc. Según las formas de controlar la subjetividad se han desarrollado distintos métodos.

##### **3.6.1.1 Métodos directos de subjetividad aceptada**

Son los más simples de los métodos directos. Aceptan como punto de partida que la apreciación estética del paisaje es claramente subjetiva. Para su aplicación la valoración tiene que ser realizada por profesionales con mucha experiencia y buen criterio, manteniendo unos estándares estables en la evaluación. El resultado suele ser una división del territorio clasificada en unas cuantas categorías; por ejemplo:

*Calidad visual:*

Excelente  
 Muy buena  
 Buena  
 Regular  
 Mala

**3.6.1.2 Métodos directos de subjetividad controlada**

Los métodos directos aceptan que la valoración ha de ser subjetiva (Fines, 1968), debido a que el paisaje produce una impresión originada por emociones, curiosidad, sorpresa, veneración, etc., pero sistemática y establecida, donde los resultados de su aplicación en un área puedan ser comparables a los establecidos en un área distinta. Para la comparación se utiliza escala de valores de paisaje, cuyas categorías y valores son:

**Tabla 1.** Escala de valores de paisaje

<b>Categorías</b>	<b>Valores</b>
Espectacular	16 a 32
Soberbio	8 a 16
Distinguido	4 a 8
Agradable	2 a 8
Vulgar	1 a 2
Feo	0 a 1

### **3.6.1.3 Métodos directos de subjetividad compartida**

Con estos métodos se realiza la valoración por medio de la dinámica de grupo mediante un proceso iterativo hasta conseguir un consenso. En este tipo de métodos las valoraciones personales se someten a la discusión hasta que se alcanza un consenso y todo el grupo se pronuncia por un valor único.

### **3.6.1.4 Métodos directos de subjetividad representativa**

La valoración en este método se realiza por una determinada cantidad de personas cuya opinión global sea representativa de la proporcionada por la sociedad. Estos métodos emplean las técnicas utilizadas en los estudios de preferencias, siendo frecuentemente denominados como modelos de preferencias. La principal dificultad de este método viene dada en la obtención de la muestra para que en el proceso de valoración sea representativa de las preferencias del público respecto de las cualidades visuales del paisaje.

## **3.6.2 Métodos indirectos**

Los métodos indirectos son el grupo de métodos más numeroso de técnicas de valoración de la calidad y son también los más antiguos. Contienen métodos cualitativos y cuantitativos que evalúan el paisaje mediante el análisis y la descripción de sus componentes. Los

componentes pueden ser elementos o *factores* físicos (forma del terreno, vegetación, etc., o categorías estéticas (variedad, intensidad, contraste, etc.) y en determinados casos una mezcla de ambos.

### **3.6.2.1 Métodos de valoración a través de componentes del paisaje**

Estos métodos utilizan para la desagregación características físicas del paisaje como, por ejemplo, la topografía, los usos del suelo, la presencia de agua, etc. Cada unidad de paisaje se valora en términos de cada componente agregándose después los valores parciales para obtener un valor final. Las diferencias entre los distintos métodos se establecen en los componentes seleccionados y en el tipo de valoración cada uno.

### **3.6.2.2 Métodos de valoración a través de categorías estéticas**

La particularidad de estos métodos se debe a que se realiza la valoración a través de una serie de categorías estéticas, definidas con mayor o menor precisión, como unidad, variedad, contraste, ritmo, etc. Cada unidad se valora según las categorías establecidas, agregando o compatibilizando las valoraciones parciales en un valor único para cada unidad. La principal dificultad de estos métodos se debe al establecimiento y definición de las categorías estéticas que se emplean.

### **3.6.3 Métodos mixtos**

Este tipo de métodos combinan las ventajas de los métodos directos e indirectos. Están basados en la idea de que la valoración sólo puede realizarse de forma directa, pero utilizan la desagregación en componentes bien para refrendar o contrastar la valoración directa, bien como instrumento para facilitar o simplificar dicha valoración. En ellos se realiza una valoración directamente y un análisis de componentes para averiguar la participación de cada uno en el valor total.

### **3.6.4 Aplicaciones de los métodos de valoración del paisaje a partir de cartografía**

El análisis visual se utiliza en los métodos de valoración del paisaje indirectos basados en la percepción estética y en los métodos mixtos. A continuación se recogen algunos ejemplos de aplicación de estos métodos, en los que se describe la forma que se realiza el análisis.

Martínez Vega, Martín Isabel y Romero Calcerrada (2003) en la valoración del paisaje en la zona de especial protección de aves carrizales y sotos de Aranjuez (Comunidad de Madrid) calcularon las cuencas visuales de los elementos que añaden y restan calidad al paisaje considerando una distancia visual de 4 km y una altura media del observador de 1,8 m, utilizando un modelo digital de elevaciones en formato ráster con un tamaño de celda de 10 m.

Martín Ramos (2014) en su tesis doctoral elaboró una propuesta de valoración del paisaje en la integración de autopistas, mediante cuencas visuales de 21 puntos de observación de forma perpendicular a la dirección de la marca con una visual de 180° en una autopista, con el modelo digital de elevaciones del IGN.

Serrano Giné (2015) en su valoración escénica de paisaje periurbano con utilidad en planeamiento territorial de la Región Metropolitana de Barcelona en la que realizó cuencas visuales de los elementos que suman o restan valor al paisaje considerado una altura estándar de 1,80 m para el observador y un alcance de observación de 4 km.

Ezquerria y Navarra (2015) propusieron una metodología para la valoración del paisaje con el uso de un SIG aplicado a las vías pecuarias, donde calculan la cuenca visual a partir de modelos digitales del terreno con resolución de celdas de 100 y 200 m con una distancia de cuentas de 5.000 m para las vistas y los recursos físicos y de 3.000 m para los recursos biológicos.

### **3.7 Modelos digitales de elevaciones, modelos digitales el terreno y modelos digitales de superficie**

#### **3.7.1 Definiciones**

Para elaborar la cuenca visual se utilizan diferentes modelos digitales de la superficie terrestre diferenciados según los elementos que representan; a continuación se recoge la definición de estos:

El término genérico que habitualmente se usa para englobar a todos los modelos es el modelo de elevación digital (MDE), es uno de los componentes importantes del entorno de datos espaciales digitales y sus aplicaciones. Un modelo de elevación se puede representar como nubes de puntos regulares o irregulares formadas por medio de un modelo matemático.

Según Fisher y Tate (2006) el modelo digital de elevación tiene dos significados generales. El primero, es cualquier conjunto de mediciones que recogen la elevación de la superficie de la tierra, por lo que la proximidad espacial y las relaciones espaciales entre esas mediciones puede determinarse de forma implícita o explícitamente. Por otro lado, una lista de mediciones del trío de elevación, junto con X e Y para dar la localización sí que constituyen un MDE, porque las relaciones espaciales de las elevaciones se pueden crear con la información de ubicación. En segundo lugar, y de forma más específica, un MDE se compone de valores de elevación que están registrados en una malla regular, normalmente en forma de cuadrado, con menor frecuencia en



una forma triangular o rectangular. Puesto que son conocidas las dimensiones de la malla y el número de observaciones en cada fila, las relaciones espaciales implícitas entre los valores de elevación se pueden determinar.

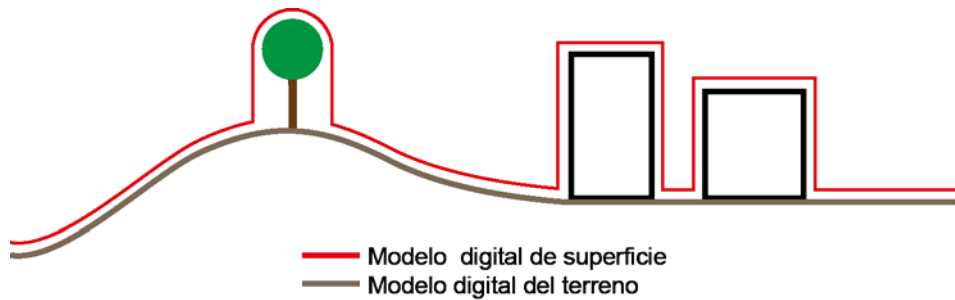
Un modelo digital del terreno (MDT) se define como un conjunto de parámetros de superficie situados en un sistema arbitrario de coordenadas y almacenados en forma digital es una comprensión más amplia (Wise, 1998, Pike, 2002, Li *et al.*, 2005, Fisher & Tate, 2006, Zhou *et al.*, 2008).

Un modelo digital de superficie (MDS) por lo general se construye utilizando algoritmos de extracción automáticas (es decir, la correlación de imágenes en la estéreo-fotogrametría o el primer pulso de datos LiDAR). Un MDS representa la superficie de todos los objetos en el terreno (tanto la vegetación y las características hechas por el hombre) o sólo el terreno sí el área es abierta.

El modelo 2,5-digital de superficie urbana (2,5-DUSM) de los contornos de construcciones y de las líneas del techo fue definido por Carneiro (2011). Estos modelos son similares a los modelos digitales de elevaciones y se construyen con un enfoque híbrido que integra los datos LiDAR con mapas digitales vectoriales 2D.

Otro modelo sería el modelo digital de superficie normalizado (nMDS), que es el resultado de la resta del DTM y el MDS. También se llama modelo de altura de la copa (CHM) y modelo digital de copas cuando su

aplicación es forestal (Hyyppä & Inkinen, 1999; Popescu, Wynne, & Nelson, 2003).



**Figura 5.** Diferencias entre modelo digital de superficie y modelo digital de terreno

Las ventajas de utilizar datos LiDAR en los modelos digitales se debe a que incluyen alta densidad de datos de muestreo, de alta precisión vertical, y la oportunidad de obtener modelos de superficie, algunos sistemas de escaneo láser ya pueden proporcionar por lo menos dos versiones de la superficie: el dosel de la vegetación (primeros retornos) y la superficie del suelo (últimos retornos), lo que debería ayudar con los presupuestos del modelado en zonas de mucha vegetación (bosques) y en entornos construidos (es decir, zonas urbanas) (Wilson, 2012). Los datos LiDAR representan una nueva e independiente tecnología para la generación altamente automatizado de modelos digitales de superficie (Ackermann, 1999).

### **3.7.2 Métodos de interpolación para la obtención de un modelo digital de superficie**

Los métodos de interpolación que se pueden encontrar en un programa de sistemas de información geográfica a la hora de realizar un modelo digital de elevaciones se describen a continuación.

#### **3.7.2.1 Distancia inversa ponderada (IDW)**

El método de interpolación distancia inversa ponderada determina los valores de celda a partir de una combinación ponderada linealmente de un conjunto de puntos de muestra. La ponderación es una función de la distancia inversa. La superficie que se interpola debe ser la de una variable que depende de la ubicación.

Este método presupone que la variable que se representa cartográficamente disminuye su influencia a mayor distancia desde su ubicación de muestra.

#### **3.7.2.2 Topo a ráster**

La herramienta Topo a ráster es un método de interpolación diseñado específicamente para crear MDEs hidrológicamente correctos.

La versión actual de ANUDEM utilizada en ArcGIS es 5.3. La herramienta en el programa ArcGIS se denomina Topo a ráster.

Topo a ráster interpola los valores de elevación para un ráster mientras se imponen restricciones que aseguran:

Una estructura de drenaje conectado

La correcta representación de crestas y arroyos a partir de los datos de curvas de nivel de entrada

Este método interpola de forma iterativa las diferencias finitas y está optimizado para obtener la eficiencia de cálculo de los métodos de interpolación local, como el gravitacional, y la de los algoritmos globales como son el kriging y las curvas adaptativas o *splines* (ESRI, 2010).

### 3.7.2.3 Kriging

El método de interpolación *Kriging* se basa en modelos estadísticos que incluyen la autocorrelación, es decir, las relaciones estadísticas entre los puntos medidos. Esta técnica de estadística geográfica no sólo tiene la capacidad de producir una superficie de predicción, sino que también proporciona medidas certeras o de precisión de las predicciones.

*Kriging* presupone que la distancia o la dirección entre los puntos de muestra reflejan una correlación espacial que puede servir para explicar la variación en la superficie. La herramienta *Kriging* ajusta una función matemática a una cantidad especificada de puntos o a todos los puntos dentro de un radio específico para determinar el valor de salida para cada ubicación. *Kriging* es un proceso de varios pasos, entre los que se incluyen el análisis estadístico exploratorio de los datos, el modelado de variogramas, la creación de la superficie y (opcionalmente) la exploración de la superficie de varianza. Este método es más adecuado cuando se sabe que hay una influencia direccional o de la distancia correlacionada espacialmente en los datos.

#### **3.7.2.4 Vecino natural**

El método de interpolación Vecino natural halla el subconjunto de muestras de entrada más cercano a un punto de consulta y aplica ponderaciones sobre éstas basándose en áreas proporcionales para interpolar un valor (Sibson *et al.*, 1981). También es conocido como interpolación de Sibson o de "robo de área". Sus propiedades básicas son que es local, utiliza solo un subconjunto de muestras que circundan a un punto de consulta y asegura que las alturas interpoladas estén dentro del rango de las muestras utilizadas. No infiere tendencias ni produce picos, depresiones, crestas o valles que no se encuentren ya representados por las muestras de entrada. La superficie pasa por las muestras de entrada y es suave en todas partes, excepto en las ubicaciones de las muestras de entrada.

#### **3.7.2.5 TIN a ráster**

El método de interpolación de TIN a ráster a partir de una red irregular de triángulos Delaunay (TIN) crea un ráster mediante la interpolación. En este método se realiza una interpolación lineal simple dentro de la faceta triangular del TIN en nodos de la red que no es natural, aunque se maneja fácilmente. La interpolación de la superficie del TIN de entrada ocurre a intervalos regulares, y es de esperar que se pierda información en el ráster de salida (ESRI, 2010).

### 3.7.2.6 Punto a ráster

El método de interpolación De punto a ráster calcula la elevación de cada celda del ráster a partir de la media de todos los puntos LIDAR clasificados como terreno dentro de la celda. En el caso de que la celda no contenga ningún punto se genera un dato de interpolación a partir de las celdas vecinas. Este método de interpolación se ha realizado con las herramientas incluidas en el programa FUSION (Mc Gaughey, 2009).

### 3.7.2.7 Superficie de mínima curvatura Spline

Según Mitášová y Mitáš (1993) los métodos *Spline* suavizador regularizado o con tensión son métodos de funciones de base radial para la interpolación de los datos esparcidos. Estos son flexibles, debido a que el parámetro de tensión y el suavizador controlan las propiedades de la función de interpolación.

El método de regresión calcula varios parámetros, los que se ajustarán a la ecuación que puede ser lineal, cuadrática, cúbica o de mayor orden. La fiabilidad del ajuste depende de la cantidad de puntos de altura conocida de la base de datos.

La limitación del método *Spline* o de superficie de mínima curvatura se debe a que la influencia se extiende hacia el total del área de los puntos conocidos, generando un efecto global en la estimación, reduciendo así la fiabilidad de los resultados.





## **4. MARCO TEÓRICO**



## 4. MARCO TEÓRICO

### 4.1 Estudios previos sobre la generación de modelos digitales de superficie a partir de datos LiDAR

Desde la aparición de la tecnología LiDAR ha habido varios investigadores que han analizado los modelos digitales de superficie obtenidos a partir de distintos métodos de interpolación con el fin de determinar el método que genera los modelos más precisos. En este apartado se recogen algunos de estos estudios:

Gonçalves (2002) analizó los errores de interpolación en modelos digitales de superficie de una zona urbana a partir de datos LiDAR calculando el error medio cuadrático y el coeficiente de correlación. Los métodos de interpolación que utilizó en su estudio fueron, *Inverse Distance Weighting*, *Triangulation Linear Interpolation*, *Minimum Curvature* y *Radial Basic Functions*. En los resultados obtuvo que la mayor correlación en todos los métodos de interpolación se obtuvo con el menor tamaño de celda del ráster (0,5 m), por lo que sugiere que es el más apropiado para la construcción del MDS. En el método de interpolación cuando se elabora con densidad de puntos menores a 4 puntos/m<sup>2</sup> la correlación es menor con el MDS de referencia, mientras que en los otros métodos de interpolación no cambia.

Smith, Holland, Longley, Survey y Road (2003) estudiaron el efecto del cambio del tamaño de celda en la generación de modelos digitales de

superficie a partir datos LiDAR. Se estudiaron tres tamaños de celda y fueron identificadas las magnitudes y los patrones espaciales de cada uno de ellos. Se crearon cuarenta y cinco modelos digitales de superficie por medio de cinco métodos de interpolación (*Kriging*, *Bilinear*, Bicúbico, *Spline* y Vecino natural) y tres tamaños de celda diferentes, 1, 2 y 4 m. El análisis de identificación del error reveló diferencias significantes entre los métodos de interpolación, se encontró que el método *Kriging Ordinario* producía el error más bajo a todas las resoluciones. *Kriging Ordinario* también fue considerado el más estable de todos los métodos. El método que produjo mayores errores fue el de Vecino natural. En los tres experimentos se muestra que había muy poca diferencia entre los errores producidos entre los métodos *Bilinear* y Bicúbico. En cuanto a la resolución, casi todos los métodos producen menores errores con el tamaño de celda de 2m, mientras los mayores errores fueron encontrados en los rásters de tamaño de celda de 4 m.

Phelps (2011) realizó modelos digitales de superficie de una zona montañosa con vegetación. La resolución de las mallas del ráster de los MDS fueron de 0,5 m, 1 m, 5 m y 10 m, donde se utilizaron los métodos de interpolación: *Trianguled Irregular Network* (TIN), *Inverse Distance weight* (IDW), *Spline*, *Original Kriging* (OK) y *Universal Kriging* (UK). En esta investigación los MDS fueron generados con la densidad total de puntos LiDAR y reducidos a 80 %, 60 %, 40 %, 20 % y 5 %. En los resultados obtuvo que los métodos de interpolación OK y UK eran los que menores errores medios cuadráticos producían en todas la resoluciones y densidades analizadas, aunque uno de los problemas de estos métodos de interpolación fue que tienden a suavizar la

información del MDS. El método de interpolación TIN produjo mejores resultados que Spline. También demostró que cuando la resolución aumenta el detalle de la superficie de vegetación interpolada decrece. Los MDS realizados con alta densidad de puntos produjeron mayor incertidumbre.

Montealegre, Lamelas y Riva, (2014) evaluaron varios métodos de interpolación en la generación de modelos digitales de elevaciones para la normalización de la nube de puntos LiDAR-PNOA en aplicaciones forestales. Los métodos de interpolación utilizados fueron IDW, Kriging Ordinario, Vecino natural, TIN a ráster, ANUDEM y Punto a ráster, con rústers con resolución espacial de 1 y 2 m. En los resultados obtenidos, los errores cuadráticos medios aumentaban al disminuir la resolución espacial y el método de interpolación con el que se obtuvo la mejor precisión fue TIN a ráster. En cuanto a los errores medios absolutos estos también fueron muy consistentes entre interpoladores y variaron más entre resoluciones espaciales.

#### **4.2 Estudios previos sobre la comparación de la cuenca visual realizada a partir de diferentes programas informáticos de SIG**

Han sido muchos los autores que desde la aparición de los programas de sistemas de información geográfica han realizado comparaciones sobre la cuenca visual que se genera con cada uno de ellos, tanto en

programas comerciales como en libres; a continuación se recogen los estudios que se han realizado anteriormente a esta investigación:

Fisher (1993) comparó el resultado de la cuenca visual realizada con siete programas informáticos partiendo de un modelo digital de elevaciones en formato IDRISI ASCII. Los siete programas utilizados fueron IDRISI, OSU Map-for-the-PC, PC MAP, Map II, GRASS, Arc/Info y EPPL. En la comparación algunos programas fueron excluidos ya que no pudieron ser exportados al mismo formato para poder compararlos. Los programas PC MAP y OSU Map-for-the-PC fueron los únicos en los que se obtuvieron exactamente los mismos resultados. Los otros programas produjeron diferentes resultados, pero con áreas visibles considerablemente más extensas que MAP.

Cheng y Shih (1998) analizaron la cuenca visual obtenida con diferentes algoritmos de los programas informáticos ARC/INFO 6.0, GRASS 4.1 y por un algoritmo desarrollado por ellos integrado en la aplicación ViewShed. En el análisis tomaron el número de píxeles diferentes y el coeficiente de correlación para determinar similitudes entre los algoritmos, identificando dónde ocurrían las variaciones. Realizaron las cuencas visuales desde los mismos puntos para compararlas, y observaron que las cuencas visuales desde el mismo punto eran generalmente iguales, aunque el grado de similitud variaba según la localización del punto. A partir de dos perfiles de la línea de visión hallaron que la variación de esta ocurría frecuentemente en el área donde la pendiente del terreno cambiaba.

Nielsen y Costopoulos (2005) calcularon la cuenca visual a partir de un modelo digital de elevación en una variedad de tipos de terreno mediante tres tipos de programas de sistemas de información geográfica (IDRISI, ArcMap y GRASS). Obtuvieron que la discrepancia es mayor donde la pendiente cambia, así como en las crestas y bordes de las depresiones del paisaje. El análisis por pares entre IDRISI-GRASS e IDRISI-ArcMap mostró que las cuencas visuales obtenidas con los programas GRASS e IDRISI estaban muy de acuerdo, mientras que la comparación con ArcMap-IDRISI mostraba considerables diferencias. También se comprobó que la cuenca visual generada con IDRISI fue mayor que la de ArcMap.

Riggs y Dean (2007) analizaron la cuenca visual a partir de la conversión de una superficie TIN a ráster, obteniendo un modelo digital de elevaciones, con los tamaños de celda 1, 4, 8, 10, 12, 16 y 20 m. La cuenca visual se hizo usando los siguientes programas informáticos: ArcGIS 9.1, ArcView, Imagine e IDRISI. Los resultados de cada programa se convirtieron a formato vectorial polígono (*Shapefile*) para mostrar que área de la zona de estudio era visible. Posteriormente se realizó un estudio de campo obteniendo diversos puntos de control para determinar si eran o no visibles. Los resultados de los programas ArcGIS y ArcView produjeron los idénticos resultados, debido a que estos programas utilizan el mismo algoritmo debido a que han sido producidos por la misma casa comercial (ESRI). Los resultados de las cuencas visuales obtenidas con los productos de ESRI estuvieron más de acuerdo con los los estudios de campo. Respecto a la resolución del

tamaño de celda de los rásters, se constata que la precisión de la cuenca visual era mayor cuanto menor era su tamaño.

Růžičková, Dohnalová y Růžička (2012) estudiaron el análisis de visibilidad con un modelo digital de superficie a partir de dos programas informáticos (ArcGIS y GRASS). El punto de observación utilizado fue una línea, pero para este caso el programa GRASS no permite introducir una línea como punto de observación, por lo que tomaron los nodos y vértices de la línea como puntos de observación. La cuenca visual generada a partir de estos fue sumada para obtener la cuenca visual de la línea, con diferentes densidades y ubicaciones de los puntos. Concluyeron que la cuenca visual depende de la densidad y ubicación de los vértices en la línea y que en el programa GRASS se obtienen mayores áreas visibles que en ArcGIS. Al cambiar el espaciamiento de los vértices en la línea de observación en la cuenca visual de GRASS el área de visibilidad varía, mientras que en ArcGIS esta tendencia no es perceptible. En ArcGIS el área visible generada es más pequeña cuanto más pequeño es el tamaño de pixel del modelo digital de superficie y más grande es la distancia entre vértices en la línea de observación.

Junker (2014) comparó el resultado de la cuenca visual creada con los programas ArcGIS y QGIS (usando el *plugin Viewshed Analysis*) a partir de un modelo digital de elevaciones en el estudio de la localización de aerogeneradores. Así obtuvo que ArcGIS sistemáticamente sobreestima la visibilidad, sin embargo, la correlación entre ambos programas



informáticos resultó ser muy alta (0,97) y estadísticamente significativa, ambos en el análisis binario de la visibilidad.

### **4.3 Estudios previos sobre la realización de la cuenca visual a partir de datos LiDAR**

El análisis visual a partir del uso de la cuenca visual utilizando datos LiDAR es muy reciente, a continuación se presentan algunos estudios de varias disciplinas en orden cronológico al respecto:

Lindsey *et al.* (2008) investigaron la teledetección y los sistemas de información geográfica (SIG) para mejorar el modelo de tráfico en una vía verde urbana. Tomaron medidas diarias del tráfico diario recogido en una red de 30 contadores de infrarrojos desplegados sobre un sistema de senderos de 33 millas en Indianápolis, Indiana. Entre los resultados, muestran cómo crear modelos digitales de superficie en tres dimensiones utilizados para crear las cuencas visuales de los senderos, las cuales midieron y caracterizaron. Para ello usaron modelos de regresión para correlacionar el tráfico con las características de las cuencas visuales y con otras variables del barrio y de control. Las cuencas visuales se generaron a partir de 4173 puntos en el sistema de vías verdes. Se creó la visibilidad acumulada de para cada segmento, tomando la unión de las cuencas visuales para cada ubicación de la muestra dentro de un segmento.

Wilson *et al.* (2008) aplicaron un modelo visual con las características de las rutas peatonales urbanas de un modo más eficiente. Utilizaron un sistema de información geográfica datos LiDAR para la realización de las cuencas visuales digitales representando las propiedades visuales de los paisajes desde perspectivas peatonales. El modelo digital de superficie se hizo con el método de interpolación IDW y con una resolución de 1,5 m. Este método se define como biofísico del paisaje visual porque integra lo biológico y lo físico con el análisis de la cuenca visual en la estimación de las componentes de percepción del paisaje. El mapa que ilustra el modelo biofísico del paisaje para rutas peatonales se aplicó en la ciudad de Indianápolis, Indiana, USA. El mapa principal muestra la magnitud visual superpuesta sobre la superficie 3D a partir de datos LiDAR. Un mosaico de fotografías aéreas es utilizado como fondo en la ayuda al lector del mapa para orientarse y para proveer el contexto del modelo de superficie y las variables de las cuencas visuales.

Hamilton y Morgan (2010) calcularon la distancia y la visibilidad a distintos recursos determinados, como una playa, un río o un lago, para medir el valor de casas con modelo de precios de la propiedad; con el uso de un SIG y de datos LiDAR realizaron los cálculos. El modelo digital de superficie se realizó con el método de interpolación IDW a partir de los datos del primer retorno de los datos LiDAR y con 1 m de resolución. Los datos LiDAR proporcionaron información sobre la superficie topográfica de la zona costera, incluyendo todas las estructuras, las dunas y la vegetación. Los datos LiDAR en el modelo permitieron que el impacto de la visibilidad fuese aislado, el coeficiente

positivo y significativo de la visibilidad implica que los futuros propietarios estuvieran dispuestas a pagar una prima para la vista desde la casa a un recurso determinado, así como su acceso.

Hindsley *et al.* (2013) analizaron la influencia de las vistas del Golfo de México sobre los precios de venta de casas residenciales en el Condado de Pinellas, Florida. Utilizaron datos LiDAR para la construcción de cuatro vistas continuas del Golfo de México, obteniendo la visibilidad total, el segmento máximo de punto de observación, el segmento medio de punto de observación y la proximidad al contenido de la vista. Los resultados ilustraron que los propietarios de residencias tienen una disposición marginal mayor a pagar para vistas totales más extensas y con segmentos de vista mayores. Los resultados también indicaron que la proximidad de las viviendas al contenido de las vistas influye en la valoración.

Murgoitio *et al.* (2013) investigaron sobre la representación realista de corto alcance de la visibilidad obtenida afectada por las obstrucciones troncales de los árboles a partir de datos LiDAR. Las ramas y hojas no se incluyeron por las limitaciones de los datos LiDAR aéreos. Para probar la exactitud del tronco del árbol en el modelo de obstrucción, los resultados de cálculo se evaluaron frente a los datos de referencia derivados a partir de fotografías digitales a intervalos de distancia predefinidas. Se utilizaron total de 15 parcelas de visibilidad en un nivel micro-escala, con el modelado de la visibilidad a un máximo de 50 m del punto de observación. Las fotografías digitales se hicieron con un objetivo de 1 m<sup>2</sup> fijadas en incrementos de 5 m a lo largo de tres

caminos La línea de visión para cada parcela de visibilidad se utilizó para establecer los valores de control de la visibilidad. Las obstrucciones de troncos, las alturas medias de la vegetación derivadas de los datos LiDAR y procesadas a través de una serie de algoritmos de estructura de árbol, se utilizaron en los cálculos de visibilidad y se compararon con los datos de referencia. Los resultados indican que el modelo calculado para las obstrucciones del tronco con LiDAR se obtuvo un error medio del 8,8 % en la subestimación de la visibilidad de destino, mientras que los métodos alternativos a través de modelos de media altura de la vegetación y modelos digitales del terreno tienen una subestimación del 65,7 % y la sobreestimación de 31,1 %, respectivamente.

Meek, Goulding y Priestnall (2013) investigaron la eficacia de los diferentes tipos de modelos de visibilidad para uso dentro de los servicios basados en ubicación. Describieron una metodología diseñada para entender la precisión y los efectos de las opciones del modelo para consultar la visibilidad móvil. Desarrollaron una aplicación móvil llamada Zapp, donde los niveles de precisión de diferentes representaciones de superficies digitales para una línea de visión del algoritmo de visibilidad son ampliamente examinados estadísticamente para evaluar las muestras al azar de los sitios de visión en 1 km<sup>2</sup> de la zona de estudio, en relación con los puntos de interés (POI) en todo el campus de la Universidad de Nottingham. La prueba se llevó a cabo en tres modelos de superficie diferentes derivados con 0,5 m de resolución, proveniente de datos LiDAR. Donde se tomaron los puntos de los lugares físicamente en cada modelo de superficie, con un total de 190 puntos.

Cada sitio se verificó en el terreno mediante la determinación de si un POI determinado podría ser visto por el usuario y también podría ser identificado por el dispositivo móvil. Este experimento realizado en una zona semi-urbana demuestra que la elección del modelo de superficie tiene implicaciones importantes para las aplicaciones móviles que utilizan la visibilidad para la consulta de operaciones geoespaciales.

Pellicer, Estornell y Martí (2014) analizaron la idoneidad de las cuencas visuales para estudios de paisajismo o impacto ambiental en 4 zonas con características diferenciadas (urbana, forestal, playa y mixta) del municipio de Gandia a partir de diferentes modelos digitales de información cartográfica: a) Modelo Digital del Terreno y b) Modelo Digital de Superficie calculados a partir de datos LiDAR con una densidad media de 1 punto/m<sup>2</sup>; c) MDT de tamaño de píxel 5×5 m derivado de un vuelo fotogramétrico; d) Superposición cartografía catastral y el MDT anterior. Para validar las cuencas visuales obtenidas utilizaron 120 puntos de muestreo a partir de los que calcularon la fiabilidad global e índice Kappa. Los resultados mostraron una fiabilidad global muy alta en las cuencas visuales calculadas a partir del MDS derivado de los datos LiDAR siendo la fiabilidad global e índice kappa del 90 % y 0,80 %, respectivamente. Estos resultados indicaron la idoneidad de esta fuente de información en la generación de cuencas visuales para su aplicación en los estudios de paisajismo o impacto ambiental.

Lonergan *et al.* (2015) estudiaron la colocación de señales de evacuación que indican a los lugareños y visitantes la ruta que deben

tomar en caso de riesgo de tsunamis en Seaside, Oregon, desde una perspectiva de visibilidad. Desarrollaron un enfoque topológico 3D para el análisis de visibilidad con conjuntos de datos brutos LiDAR. Los puntos de observación de las cuencas visuales usados fueron los de localización de las señales. Para la obtención de la cuenca visual realizaron un modelo digital de elevaciones con 1 m de resolución que incluye los árboles, la vegetación y las infraestructuras urbanas. Como resultado obtuvieron los espacios que son visibles desde una señal, pero lo más importante fue determinar el espacio en el que un observador puede ver una señal a través del principio de intervisibilidad.

Klouček *et al.* (2015) evaluaron la idoneidad de los modelos digitales de superficie variando los niveles de detalle (un modelo basado en LiDAR y modelos basados sobre datos vectoriales a diferentes escalas) para simples análisis de cuenca visual (binarios) de aerogeneradores (tres parques eólicos que contienen cada uno entre 3 y 6 turbinas). Los modelos basados en estos datos de entrada se compararon con la visibilidad real de 150 puntos de control en lugares elegidos al azar. Los resultados del estudio confirmaron la predicción de que el modelo de cuenca visual basada en datos de entrada más precisos correspondía más con la realidad. Este estudio demostró que sólo el número de falsos positivos (en el que el modelo predice que un objeto es visible, mientras que en la realidad no lo es) dependen de la precisión de los datos de entrada, mientras que los datos de entrada no afectaron a los falsos negativos. Además, todos los modelos basados en vectores tenían mucho más falsos positivos que falsos negativos.

#### **4.4 Estudios previos sobre el análisis de la visibilidad en el planeamiento urbanístico**

Para determinar el impacto visual de las actuaciones realizadas en el medio urbano se realiza frecuentemente el análisis visual. A continuación, se recogen varios estudios en los que se aplica este tipo de análisis:

Danese, Nolè y Murgante (2009) desarrollaron un nuevo concepto de análisis visual, la cuenca visual de identificación "*identifying viewshed*", para evaluar el impacto visual en el planeamiento urbanístico. La cuenca visual de identificación muestra cuántos y qué objetos son visibles en varias áreas. Para construir el modelo digital de elevaciones en la cuenca visual tomaron datos vectoriales de líneas de contorno, puntos de altura, edificios y vegetación. El programa de sistemas de información geográfica utilizado fue GRASS. El impacto visual se probó en tres municipios Laurenzana y Venosa, en la Región Basilicata, y en Pisa, en la Toscana. Se consideraron alternativas de diferentes localizaciones del nuevo proyecto y con diferentes alturas de los edificios situados dentro de los límites del nuevo planeamiento urbano. La alternativa elegida es la que no obstruye la visibilidad de los monumentos característicos de cada municipio.

Rod y van der Meer (2009) aplican un método de análisis de la visibilidad para evaluar la ubicación de un edificio de gran altura prevista en Trondheim, Noruega. Las líneas de visión se extrajeron de un solo punto que representa el punto de observación (el edificio de gran altura)

a una serie de puntos de destino, que normalmente se tomaron como muestras en un patrón regular en el paisaje. Para la realización del modelo digital de elevaciones (MDE) utilizan mapas digitales con contorno de línea a intervalos de 0,5 m disponibles de la municipalidad de Trondheim. Utilizaron un TIN para representar la superficie combinada de elementos naturales y de las estructuras artificiales, después el TIN fue convertido a un modelo digital de elevación en formato ráster con resolución de 0,5 m. Debido a que el procesamiento de la operación de cuenca visual en ArcGIS 9.2 no funciona con un TIN, por lo que se prefirió usar un MDE. Como resultado obtuvieron la cuenca visual acumulada desde tres puntos de vista del edificio y a diferentes cotas de altura, es decir, 48, 38, 28, 18 y 8 m, y un total de seis cuencas visuales acumuladas.

Cassatella y Carlone (2013) evaluaron el análisis visual realizado con SIG en la planificación y el diseño de edificios nuevos altos. A partir de un MDS, construido mediante la combinación de las elevaciones de características naturales, edificios y la vegetación de las colinas de Turín, realizaron dos análisis de visibilidad diferentes desarrollados para tres puntos diferentes de interés. Así crearon el mapa de sensibilidad de Turín, desarrollado a partir de la superposición de la visibilidad desde cuatro puntos de vista. El resultado fue un mapa que muestra qué áreas son más visibles desde los puntos de interés seleccionados y por lo tanto el nivel de visibilidad de las transformaciones que pueden ocurrir en esas áreas.



Garnero y Fabrizio (2015) desarrollaron un método para la estimación del impacto visual de los edificios con relevancia simbólica, como los rascacielos que están fuera de escala con su espacio urbano. En la obtención de la cuenca visual se utilizó un modelo digital del terreno y los edificios en formato vectorial, los cuales se unieron en un nuevo modelo de 0,5 m de resolución, el programa de sistemas de información geográfica fue ArcGIS. Con el fin de ir más allá de si una celda es, o no es visible, lo frecuente en análisis de cuencas visuales, en este trabajo se analizaron los diversos factores que causan la atenuación visual con la distancia y cuantitativamente se evaluó mediante la determinación de diversos límites de visibilidad según las distancias. Estos factores son la agudeza visual, el contraste entre el proceso de reconocimiento del sujeto de destino y sus alrededores, y la visibilidad atmosférica. Una aplicación de esta metodología se llevó a cabo en varios edificios de estudios de casos en la ciudad de Turín, Italia (un edificio antiguo, un hito urbano, una torre y un rascacielos en construcción). A partir de los mapas de visibilidad, bajo diversas condiciones, se observó que el nuevo rascacielos sería un hito importante no sólo para toda la ciudad, sino también para los municipios circundantes.



## **5. MATERIALES Y MÉTODOS**



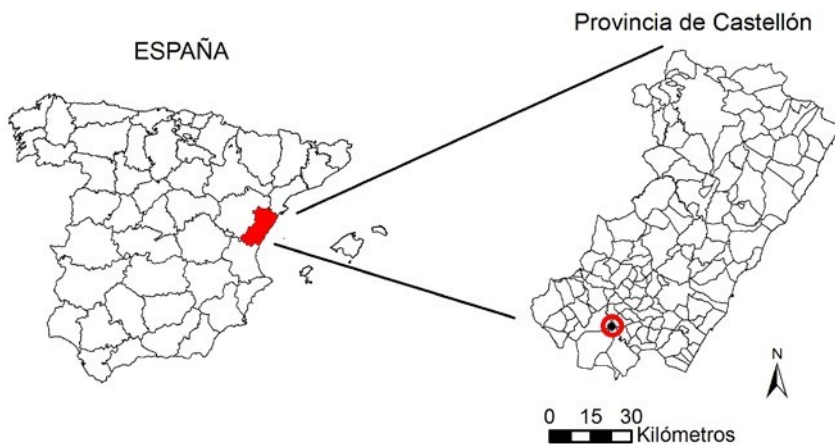
## 5. MATERIALES Y MÉTODOS

### 5.1 Materiales

#### 5.1.1 Área de estudio

Se ha elegido este municipio debido a que el estudio de paisaje estaba realizado y disponible y de este documento se han utilizado los puntos de observación para el análisis visual de la valoración del paisaje.

Navajas es un municipio situado al sur de la provincia de Castellón (Figura 6), en la comarca del Alto Palancia, perteneciente a la Comunitat Valenciana y con un área de 7,89 km<sup>2</sup>. Los municipios colindantes son Gaibiel, Vall de Almonacid, Segorbe, Altura y Jérica. La elevación del municipio de Navajas está entre 360 y 400 m.



**Figura 6.** Localización del municipio de Navajas

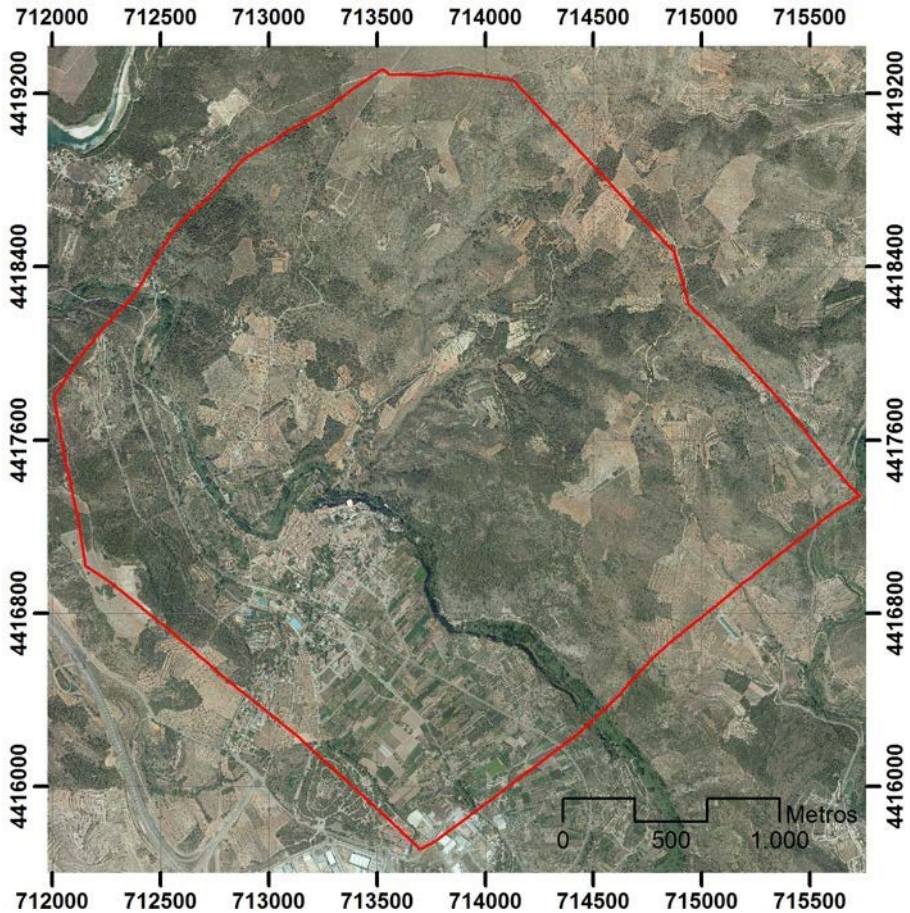


Figura 7. Ortofoto del municipio de Navajas

### 5.1.2 Datos LiDAR

Los datos LiDAR fueron tomados de la página web del Centro de Descargas del Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG), estos datos fueron capturados en el año 2009 con un sensor Leica

ALS60 de pulsos discretos y espejo oscilante. Los datos son un producto gratuito, con una densidad de 0,5 puntos por metro cuadrado (con una separación media entre puntos de 1.4 cm). La precisión altimétrica es de 20 cm y se encuentran en ficheros cuadrados de tamaño 2x2 km en formato LAZ (archivo LAS comprimido), el sistema geodésico de referencia es el ETRS89.

En el Centro de Descargas del CNIG se pueden conseguir los archivos de un área determinada en formato de ESRI *shapefile* comprimido en formato ZIP y con proyección WGS84.

Para obtener los archivos correspondientes al municipio de Navajas y con una zona de influencia exterior al perímetro de 1 km se realizó un polígono en formato *shapefile* a partir de los límites administrativos del municipio con el programa ArcGIS 10.1. Los límites administrativos se obtuvieron mediante descarga en la Infraestructura de Datos Espaciales de la Comunitat Valenciana “Terrasit” en formato *shapefile*.

El municipio de Navajas se compone en total de 13 ficheros:

PNOA\_2009\_LOTE4\_CAS\_712-4416\_ORT-CLA-COL.LAZ

PNOA\_2009\_LOTE4\_CAS\_712-4418\_ORT-CLA-COL.LAZ

PNOA\_2009\_LOTE4\_CAS\_712-4420\_ORT-CLA-COL.LAZ

PNOA\_2009\_LOTE4\_CAS\_712-4422\_ORT-CLA-COL.LAZ

PNOA\_2009\_LOTE4\_CAS\_714-4416\_ORT-CLA-COL.LAZ

PNOA\_2009\_LOTE4\_CAS\_714-4418\_ORT-CLA-COL.LAZ

PNOA\_2009\_LOTE4\_CAS\_714-4420\_ORT-CLA-COL.LAZ

PNOA\_2009\_LOTE4\_CAS\_714-4422\_ORT-CLA-COL.LAZ  
PNOA\_2009\_LOTE4\_CAS\_716-4418\_ORT-CLA-COL.LAZ  
PNOA\_2009\_LOTE4\_CAS\_716-4420\_ORT-CLA-COL.LAZ  
PNOA\_2009\_LOTE4\_CAS\_710-4416\_ORT-CLA-COL.LAZ  
PNOA\_2009\_LOTE4\_CAS\_710-4418\_ORT-CLA-COL.LAZ  
PNOA\_2009\_LOTE4\_CAS\_710-4420\_ORT-CLA-COL.LAZ

### **5.1.3 Capas vectoriales**

Para realizar el análisis visual del según la metodología de la Comunitat Valenciana se han digitalizado en formato vectorial los puntos de observación tomados del estudio de paisaje de Navajas. Estos puntos se recogen a continuación (Figura 8):

#### **NÚCLEOS DE POBLACIÓN**

Zona urbana de Navajas y Urbanizaciones

#### **VÍAS DE COMUNICACIÓN**

A-23/N-234

CV-213

CV-215

CV-2140

CV-216

Ferrocarril



## ÁREAS RECREATIVAS

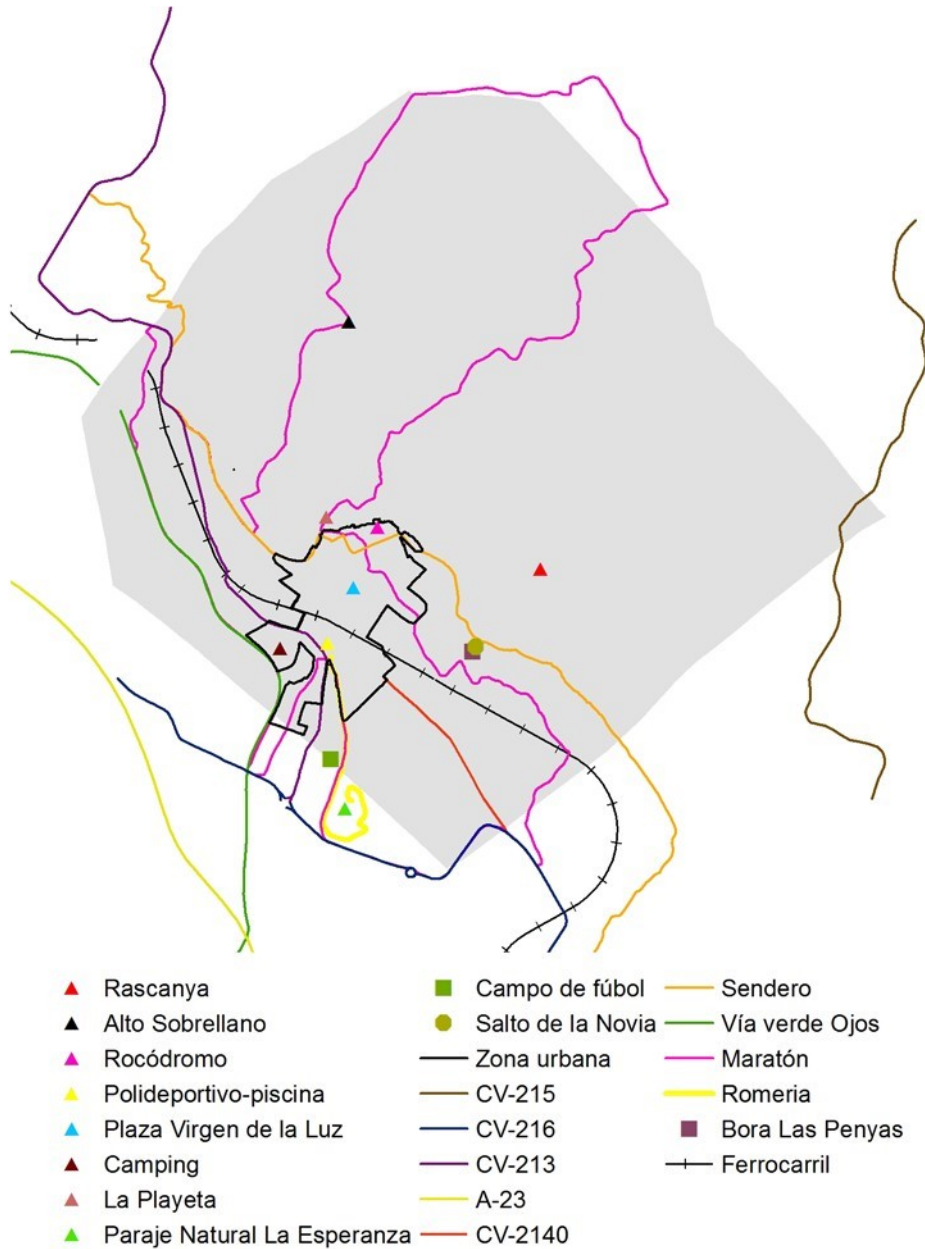
Salto de la Novia- Cascada del Erazal  
Paraje Natural La Esperanza  
Rocódromo  
Campo de fútbol  
Polideportivo – piscinas  
Plaza Nueva “Virgen de la Luz”  
Playeta  
Camping

## RUTAS/RECORRIDOS ESCÉNICOS

Vía verde “Ojos Negros”  
Romería a la Ermita de la Esperanza  
Sendero  
Maratón

## PUNTOS DE OBSERVACIÓN REPRESENTATIVOS

Rascaña  
Alto – sobrellano  
Bora las Peñas



**Figura 8.** Ubicación de los puntos de observación del estudio de paisaje de Navajas

Las capas vectoriales en formato *shapefile* de ESRI de rústica y urbana de la zona de estudio (del municipio de Navajas y de los limítrofes) se han obtenido de la Sede Electrónica del Catastro para realizar el modelo digital del terreno más las construcciones.

#### **5.1.4 Modelo digital del terreno**

De la Infraestructura de Datos Espaciales (IDE) de la Comunitat Valenciana, gestionada por el Instituto Cartográfico Valenciano, se ha obtenido el modelo digital del terreno (MDT) en formato .ers de ER Mapper del municipio de Navajas con resolución 1 m, el cual se utiliza para la compararlo con el modelo digital de superficie.

## **5.2 Metodología**

### **5.2.1 Generación de un modelo digital de superficie a partir de datos LiDAR**

#### **5.2.1.1 Procesado de los datos/algoritmos de creación de modelos digitales de superficie (MDS)**

Mediante la nube de puntos de los datos LiDAR se determinará cuál es el modelo digital de superficie (MDS) más adecuado según el tamaño de celdas de los archivos ráster y de la precisión del modelo respecto a los algoritmos usados en su realización a partir de los datos LiDAR. Se han tomado cuatro tamaños de celda para el modelo digital de superficie 1 m, 2 m, 5 m y 10 m.

### 5.2.1.2 Preparación de datos LiDAR

En primer lugar, se descomprimieron los archivos en formato LAZ a formato LAS, se utilizó el programa gratuito LasTask Tools desarrollado por el programador Alejandro de Blas y proporcionado por el Centro de Descargas del CNIG, se utiliza la herramienta “Descomprimir LAZ”.

Para obtener la nube de puntos del área del municipio analizado se utilizó la aplicación LiDAR ToolKit del programa FUSION v. 3.0.3 (McGaughey, 2009), con este mismo programa los archivos en formato LAS se unieron y se recortaron respecto al área de estudio.

Posteriormente se aplicó un filtro al archivo LAS del área de estudio para eliminar la existencia de ruido (*outlayers*). El ruido son aquellos puntos determinados erróneamente (aves, objetos, etc.).

Tras completar los pasos anteriores se procedió a la obtención de los primeros retornos de la nube de puntos separándolos de los últimos con la herramienta “FirstLastReturn” para realizar los modelos digitales de superficie (MDS). Los MDS se originan a partir de los primeros pulsos del láser y representan la superficie topográfica. Los puntos del primer pulso se reflejan desde la superficie superior, que puede ser de la vegetación, de los edificios o del terreno. El modelo digital de superficie (MDS) se obtiene tomando el valor más alto de todos los puntos dentro

de cada píxel y luego se interpola para conseguir los valores de los píxeles a los que les faltan estos valores.

### **5.2.1.3 Creación de los modelos digitales de superficie (MDS)**

Para trabajar con la nube de puntos, a partir el archivo en formato LAS se creó un nuevo archivo en formato ESRI Shapefile de puntos, el cual se denomina comúnmente capa, y así utilizarlos con el programa ArcGIS, porque el programa no permite utilizar los datos en formato LAS a la hora de usar las herramientas de los métodos de interpolación.

Los puntos en formato ESRI Shapefile obtenidos en la capa anterior se encuentran en “entidad multiparte”, que así se denomina a las capas que tienen más de una parte física pero que sólo hacen referencia a un conjunto de atributos en la base de datos, por lo que en cada registro de la tabla de atributos de la entidad están incluidos varios puntos. Para poder utilizar el valor de capa punto individualmente se han separado los puntos obteniendo los atributos de cada punto; para este paso se utilizó la herramienta de “Multiparte a parte simple” del programa.

A partir de la capa con los puntos separados se diseñaron los modelos digitales de superficies con los métodos de interpolación incluidos en la barra de herramientas “*Spatial Analyst*”.

Para cada uno de los métodos de interpolación se generaron cuatro archivos ráster según la resolución de celda de la malla (1, 2, 5 y 10 m).

De los métodos de interpolación descritos en el marco teórico se han utilizado en esta investigación los siguientes:

- Spline
- Kriging
- Vecino natural
- IDW
- Topo a ráster
- TIN a ráster
- De punto a ráster

Para calcular los 5 primeros métodos de interpolación se trabajó con el programa ArcGIS 10.1 mientras que para calcular el método De punto a ráster se usó el programa FUSION v. 3.0.3.

#### **5.2.1.4 Evaluación de la precisión en la interpolación del modelo digital de superficie**

La precisión vertical de cada modelo digital de superficie con cada método se evaluó a partir de la selección de un 5 % de puntos de control aleatorios del primer pulso de la nube de puntos LiDAR de la zona de estudio, con el objetivo de determinar el modelo digital de superficie más preciso entre los realizados, comparando con el valor de

elevación de la celda del modelo digital de superficie correspondiente. La mayoría de los métodos habituales comparan los valores de elevación del modelo digital de elevaciones (MDE) con un conjunto de puntos de control o con un subconjunto de datos originales utilizados en la generación del MDE (Desmet, 1997; Yang & Hodler, 2000).

Para comparar los valores de control con los valores de las celdas correspondientes de los modelos digitales de superficie interpolados se extrajeron los valores de estos que se incorporaron en la misma tabla de atributos de los valores de control, se utilizó la herramienta “Extraer valores según puntos”. De cada método de interpolación se ha obtenido cuatro columnas de atributos de valores según el tamaño de celda.

La precisión de los modelos digitales de superficie se evalúa habitualmente por dimensiones no espaciales como el error medio cuadrático y el error medio absoluto. Las diferencias de los dos valores de elevación fueron usadas para calcular el error medio cuadrático con el programa STATGRAPHICS Centurion XVI, un método de precisión global ampliamente utilizado para evaluar el rendimiento de los modelos digitales de elevaciones (Aguilar, Agüera, Aguilar y Carvajal, 2005), la ecuación para su obtención es la siguiente:

$$\rho = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Z_i^{\text{interpolado}} - Z_i^{\text{real}})^2}{N}} \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde  $Z_i^{int\ erpolado}$  es el punto de elevación interpolado del modelo digital de superficie al valor  $i$ ,  $Z_i^{real}$  es el punto real de elevación de la nube de puntos LiDAR y  $N$ , es el número de puntos de muestreo. El número de puntos de muestreo es el 5 % del total de todos los puntos de los datos LiDAR seleccionados aleatoriamente (Smith, Holland & Longley, 2005), se elige este porcentaje debido a que el número de puntos de muestreo elegidos con el 5 % es muy superior a los puntos obtenidos utilizando fórmulas de muestreo.

#### **5.2.1.5 Comparación entre cuencas visuales realizadas con cada método de interpolación**

A partir de los modelos digitales de superficie se han realizado las cuencas visuales, de las que se ha obtenido la correlación estadística entre ellas para determinar el grado de similitud entre ellas.

En primer lugar, se realizaron las cuencas visuales binarias (0 no visible y 1 visible) para cinco puntos de observación del área de estudio de los modelos digitales de superficie obtenidos según su método de interpolación y del tamaño de celda utilizado. El programa utilizado para el cálculo de las cuencas visuales ha sido ArcGIS 10.1.

Los parámetros para calcular las cuencas fueron las siguientes

- Altura del observador 1,6 m.
- Radio de la cuenca visual 10 km.



Las cuencas visuales obtenidas para cada método se han recortado respecto a la delimitación del municipio de Navajas para compararlos con los mismos límites, debido a que el resultado obtenido de los modelos digitales interpolados calculaba los límites del ráster de forma distinta.

Con la herramienta “Estadística de colección de bandas” del programa ArcGIS se calculó la correlación entre los mapas binarios las cuencas visuales creadas a partir de los distintos modelos digitales de superficie según su tamaño de celda.

La herramienta “Estadísticas de colección de bandas” realiza las estadísticas para el análisis multivariado de un conjunto de bandas de ráster. En este estudio se ha utilizado la opción Calcular matrices de covarianza y correlación.

La varianza muestra cuánta variación hay desde la media. En el cálculo de las varianzas, se promedian los cuadrados de las diferencias entre cada valor de celda y el valor medio de todas las celdas. Las varianzas para cada capa se pueden leer a lo largo de la diagonal de la matriz de covarianza desde la parte superior izquierda hasta la inferior derecha. Las varianzas se expresan en unidades de valor de celda al cuadrado. Las entradas restantes dentro de la matriz de covarianza son las covarianzas entre todos los pares de rásters de entrada. La siguiente fórmula se utiliza para determinar la covarianza entre las capas  $i$  y  $j$ :

$$Cov_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^N (z_{ik} - \mu_i)(z_{jk} - \mu_j)}{N - 1} \quad \text{Ecuación 3}$$

donde:

Z - valor de una celda

$i, j$  - son las capas de una pila

$\mu$  - es la media de una capa

$N$  - es la cantidad de celdas

$k$  - denota una determinada celda

La covarianza de dos capas se obtiene de la intersección de la fila y la columna apropiadas. La covarianza entre las capas 1 y 2 es la misma que la covarianza entre las capas 2 y 1. Los valores de la matriz de covarianza dependen de las unidades de valor, mientras que los valores de la matriz de correlación no.

La matriz de correlación muestra los valores de los coeficientes de correlación que representan la relación entre los dos conjuntos de datos. En el caso de un conjunto de capas ráster, la matriz de correlación presenta los valores de celda de una capa ráster a medida que se relacionan con los valores de celda de otra capa. La correlación entre las dos capas es una medida de dependencia entre las capas. Es la relación de la covarianza entre las dos capas dividido por el producto de sus desviaciones estándares. Debido a que es una relación, es un

número sin unidades. La ecuación para calcular la correlación es la siguiente:

$$Corr_{ij} = \frac{Cov_{ij}}{\delta_i \delta_j} \quad \text{Ecuación 4}$$

El valor de la correlación está entre +1 a -1. Una correlación positiva indica una relación directa entre dos capas, tal como cuando los valores de celda de una capa aumentan, es probable que los valores de celda de otra capa también aumenten. Una correlación negativa significa que una variable cambia de manera inversa a la otra. Una correlación de cero significa que las dos capas son independientes entre sí.

La matriz de correlación es simétrica. La diagonal desde la parte superior izquierda a la inferior derecha es 1 debido a que el coeficiente de correlación de capas idénticas es +1.

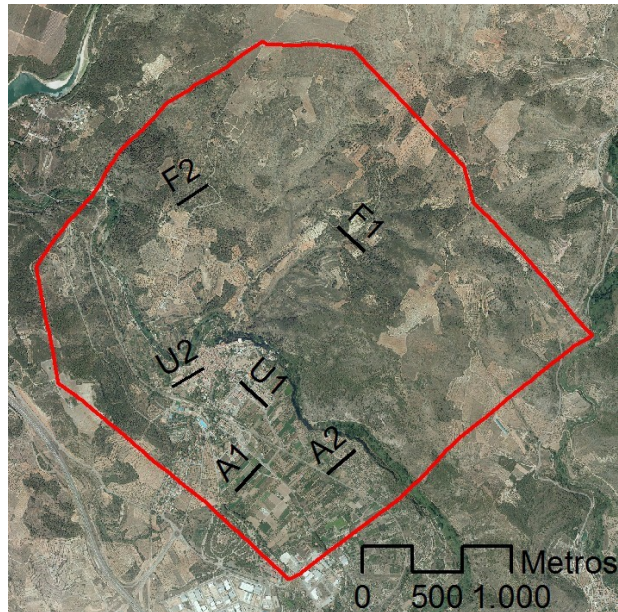
#### **5.2.1.6 Generación de perfiles longitudinales.**

En la realización de la cuenca visual se utilizan modelos digitales del terreno con distintos tamaños de celda. Para determinar el tamaño de celda óptimo y la diferencia entre ellos se ha realizado varios perfiles longitudinales en diferentes usos del suelo del municipio (agrícola, forestal y urbano).

Los perfiles longitudinales son utilizados frecuentemente para determinar las diferencias entre distintos modelos digitales de superficie. En este estudio se han realizado perfiles de modelos de superficie con distintas resoluciones (1, 2, 5 y 10 m) y del modelo digital del terreno obtenido de la Infraestructura de Datos Espaciales de la Comunitat Valenciana, para determinar las diferencias entre estos a la hora de ser utilizados en la realización de la cuenca visual.

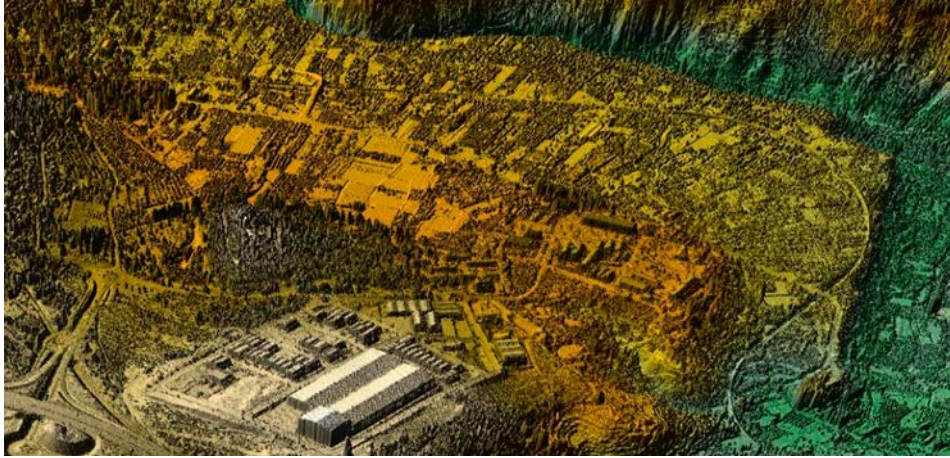
En el municipio de la zona de estudio se han realizado seis secciones, siendo dos de estos pertenecientes a un tipo de uso del suelo determinado (agrícola, forestal y urbano). Las secciones tienen una longitud de 250 m, los cuales han sido digitalizadas en el programa ArcGIS 10.1 en formato *shapefile*.

En la obtención de los perfiles se ha utilizado las herramientas “*Interpolate Line*” y “*Profile Graph*” de ArcGIS 10.1, los modelos digitales de superficie de 1, 2, 5 y 10 m, realizados con el método de interpolación Topo a ráster, el modelo digital de superficie y las secciones. De cada segmento se han obtenido 5 perfiles longitudinales, así en total se han obtenido 30 perfiles topográficos. Los perfiles para ser comparados es necesario exportar los valores a formato de Excel .xls. En el programa Excel se han incluido en un mismo perfil los diferentes perfiles correspondientes a su segmento y uso del suelo. Los perfiles obtenidos se han codificado para poder diferenciarlos mediante la primera inicial del uso del suelo analizado al que pertenecen seguidos de un número (Figura 9).



**Figura 9.** Ubicación de los perfiles longitudinales

Se ha realizado una representación en 3D con el programa Surfer 12 del modelo digital de superficie obtenido con el método de interpolación Topo a ráster y con tamaño de celda 1 m para visualizar el nivel de detalle obtenido, como se observa en la Figura 10 se pueden distinguir las edificaciones, la vegetación y las carreteras. El programa Surfer es utilizado para la representación 3D de lugares arqueológicos (Chase *et al.*, 2014; Chase *et al.*, 2014; Štular, Kokalj, Oštir, & Nuninger, 2012)



**Figura 10.** Visualización 3D del modelo digital de superficie con resolución de 1 m

### **5.2.2 Análisis comparativo de la cuenca visual realizada a partir de distintos sistemas de información geográfica**

Para la creación de la cuenca visual pueden utilizarse actualmente varios programas informáticos de sistemas de información geográfica para su cálculo, los cuales emplean diferentes algoritmos para su obtención. En este apartado de la investigación se realiza un análisis comparativo con distintos programas para hallar el grado de similitud entre ellos y determinar cuales se podrían utilizar en el análisis visual de la valoración del paisaje obteniendo cuencas visuales con resultados similares. También se compara el tiempo de procesado que requieran los programas para el cálculo de la cuenca visual.

De los programas analizados tres son de acceso libre (GRASS, gvSIG y Qgis) y tres comerciales, ENVI, ArcGIS 10.1 y Arcview 3.2. Como se ha

visto en los estudios previos recientes los programas que comparan los resultados de la cuenca visual son ArGIS, ArcView, IDRISI y GRASS, por lo que este estudio incorpora otros programas que no han sido comparados actualmente (ENVI y gvSIG). El programa ArcView 3.2 no ha sido empleado en el análisis debido a que su algoritmo es el mismo que el incorporado en el programa ArcGIS 10.1 debido a que pertenecen a la misma casa comercial.

Para realizar la comparación se han ubicado cinco puntos de observación en la superficie del suelo distribuidos en la zona de estudio (Tabla 2), para a partir de ellos realizar las cuencas visuales. La altura de los puntos de observación utilizada ha sido de 1,6 m, el radio de distancia de la cuenca visual, en el que el observador podrá visualizar los elementos del paisaje, ha sido de 10 km y no se ha tenido en cuenta el radio de curvatura de la Tierra.

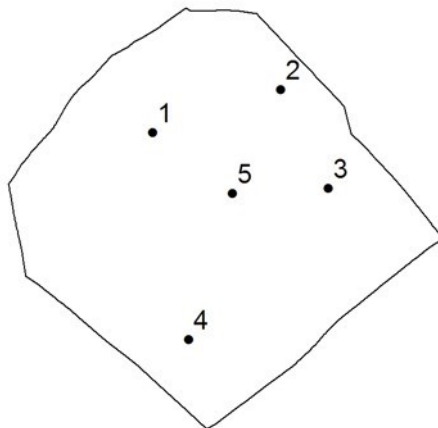
Las características del ordenador para generar las cuencas visuales son:

- Procesador Intel® Core™ i7-6500U
- Memoria RAM 16 GB DDR3L SDRAM
- Velocidad 3,1 GHz

Las coordenadas UTM en el sistema de proyección ETRS89 USO 30 son los siguientes:

**Tabla 2.** Coordenadas UTM de los puntos de observación

Puntos de observación	X	Y
1	713245	4418241
2	714337	4418611
3	714745	4417766
4	713554	4416473
5	713925	4417720



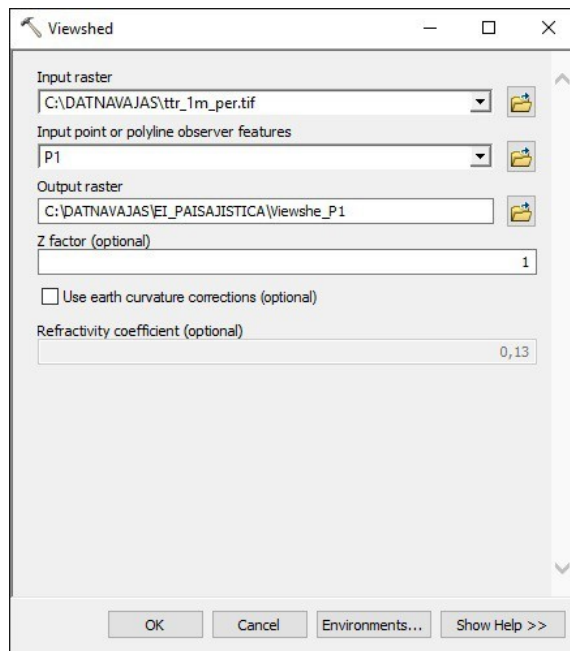
**Figura 11.** Ubicación de los puntos de observación

### 5.2.2.1 Cuenca visual realizada con ArcGIS

Con el programa ArcGIS 10 existen dos herramientas (“*Viewshed*” y “*Observer Points*”) para calcular la cuenca visual, estas integradas en la caja de herramientas “*Visibility*”. En este apartado de la investigación se



ha utilizado la herramienta cuenca visual. Para introducir la altura del observador hay que crear dos nuevos campos en la capa vectorial del punto de observación que incluya la altura de observación y la distancia máxima de realización de la cuenca visual.

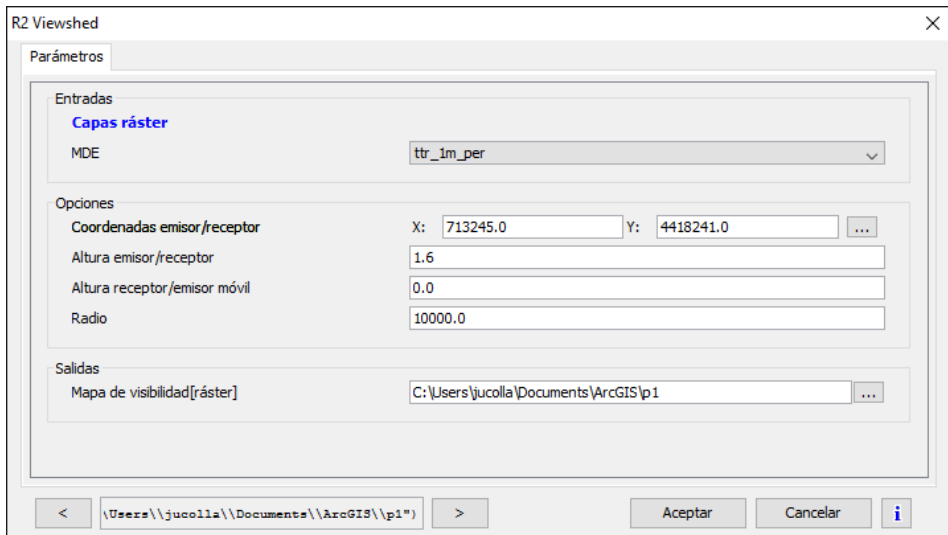


**Figura 12.** Viewshed en ArcGIS

### 5.2.2.2 Cuenca visual realizada con gvSIG

El programa gvSIG fue desarrollado en el año 2003 por la Conselleria de Infraestructuras y Transporte de la Generalitat Valenciana. En la creación de la cuenca visual utiliza la herramienta “R2 Viewshed” del

módulo SEXTANTE desarrollado por la Universidad de Extremadura, el algoritmo que utiliza este módulo fue descrito por Franklin y Ray (1994).



**Figura 13.** R2 Viewshed en gvSIG

El formato de entrada del modelo digital de superficie en gvSIG es un archivo .tif, por lo que se ha transformado el archivo ráster de ESRI a este formato. Las coordenadas de los puntos de observación se introducen manualmente, mientras que el efecto de la curvatura de la Tierra no se puede incluir.

### 5.2.2.3 Cuenca visual realizada con ENVI

Para realizar la cuenca visual en el programa ENVI 5.0 se utiliza la herramienta “*Viewshed Analysis*”, es necesario el modelo digital de

superficie y la localización de los puntos en formato vectorial, la altura del observador y la distancia de la cuenca visual se introducen manualmente. En este programa no es posible introducir la curvatura de la Tierra.

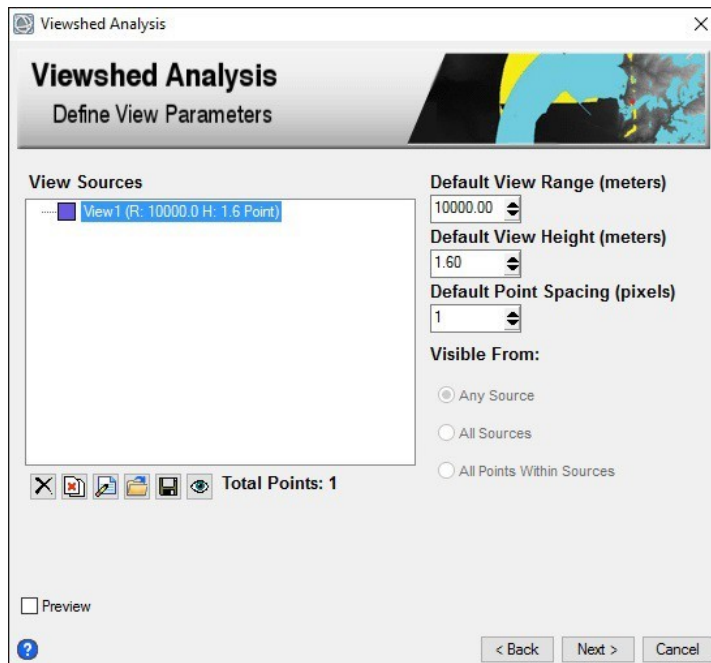
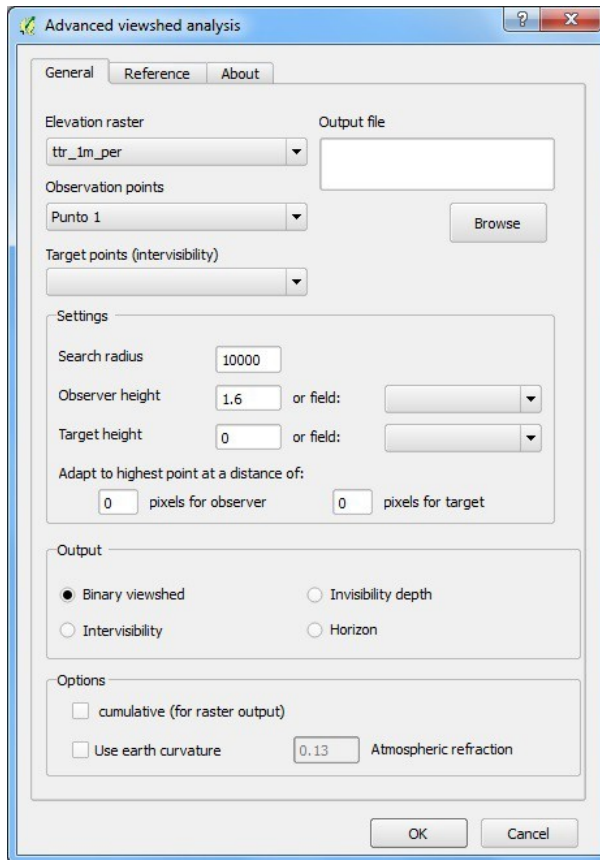


Figura 14. Viewshed Analysis en ENVI

#### 5.2.2.4 Cuenca visual realizada con QGIS

La cuenca visual con el programa QGIS versión Chugiak 2.12.0 se realiza a partir del plugin “*Viewshed Analys*” el cual no viene instalado por defecto en el programa. Este plugin ha sido desarrollado por Zoran

Čučković. El modelo digital de superficie de entrada ha sido introducido en formato .tif y los puntos de observación en formato ESRI shapefile. Con esta herramienta se puede obtener diferentes análisis visuales, en el caso de esta investigación se ha elegido la opción “*Binary viewshed*”, también permite incluir la curvatura de la tierra.



**Figura 15.** Viewshed analysis en QGIS

#### **5.2.2.5 Cuenca visual realizada con GRASS**

El programa GRASS dispone de dos herramientas para poder calcular la cuenca visual, “*r.lo*” desarrollado por Khawaja (2002) y “*r.viewshed*” desarrollado por Haverkort, Toma y Zhuang (2009) . En el programa GRASS se requiere la introducción manual de las coordenadas de los puntos de observación.

#### **5.2.2.6 Análisis estadístico de las cuencas visuales de distintos programas SIG**

Para obtener el grado de similitud entre los diferentes programas se han sumado por pares las capas en formato ráster de las cuencas visuales obtenidas de cada punto con la herramienta “Calculadora ráster” en el programa ArcGIS, obteniendo 6 comparaciones de los 4 programas utilizados.

Para determinar el grado de similitud total del resultado de las cuencas visuales las celdas visibles y no visibles obtenidas de los dos programas que han resultado iguales se han sumado, así como las celdas diferentes entre ellos. A partir de los datos obtenidos se ha realizado los porcentajes de celdas iguales y diferentes respecto al total de la malla del municipio. También se ha calculado la correlación entre las diferentes cuencas visuales obtenidas con los distintos programas.

### **5.2.3 Estudio comparativo del análisis visual realizado a partir de modelos digitales distintos**

En este punto de la investigación se va determinar la concordancia entre el análisis visual realizado con los modelos digitales del terreno (MDT) y los realizados a partir de un modelo digital de superficie (MDS).

#### **5.2.3.1 Creación de un modelo digital de superficie con las edificaciones del catastro.**

Para realizar el modelo digital de superficie se ha utilizado el programa ArcGIS 10.1.

De la Sede Electrónica del Catastro se han obtenido las capas vectoriales de rústica y urbana de la zona de estudio (del municipio de Navajas y de los limítrofes) y el MDT del municipio de Navajas con resolución 1 m de la Infraestructura de Datos Espaciales (IDE) de la Comunitat Valenciana.

En primer lugar las capas vectoriales denominadas CONSTRU, que contienen los polígonos y los volúmenes de las edificaciones, de todos los municipios se han unido en una única capa, de las que únicamente se han seleccionado las que se encuentran dentro los límites de la zona de estudio.

En la capa CONSTRU los volúmenes de las edificaciones se encuentran en números romanos, por lo que se ha utilizado un *script* de Visual Basic en el programa ArcGIS para transformar los números romanos a arábigos. Para obtener la altura total de cada edificación se ha tomado el valor de cada planta de 3 m. Los elementos cuya altura era igual a 0 han sido eliminados.

La capa resultante se ha unido con la capa de la zona de estudio para que al transformarla a ráster obtengamos un ráster con las mismas dimensiones de la zona de estudio, sin realizar este paso se obtendría un ráster únicamente con los datos en las edificaciones.

Por último, la capa de la zona de estudio se ha convertido a ráster para poder añadirla mediante suma al modelo digital de elevaciones, obteniendo así el ráster del modelo digital de superficie.

### **5.2.3.2 Aplicación de la metodología de análisis visual de la Comunitat Valenciana**

A partir de los modelos digitales de superficie generados y con el modelo digital del terreno se realiza el análisis visual para el Estudio de Paisaje del municipio de Navajas según la Ley 5/2014, de 25 de julio, de la Generalitat, de Ordenación del Territorio, Urbanismo y Paisaje, de la Comunitat Valenciana.

La metodología para realizar el análisis visual está incluida en el apartado c del punto 4 del Anexo I de la ley citada anteriormente, la que se recoge a continuación:

*c) Un análisis visual del ámbito de estudio con el objeto de determinar la visibilidad del paisaje como uno de los factores determinantes de su valoración, así como el de identificar y valorar los posibles impactos visuales de las actuaciones derivadas del plan sobre el mismo.*

*1.º La visibilidad del paisaje se determinará mediante la identificación de los recorridos escénicos vías de comunicación, caminos tradicionales, senderos o similares, con un valor paisajístico excepcional por atravesar y/o tener vistas sobre paisajes de valor el señalamiento de las vistas y zonas de afección visual hacia y desde las unidades y recursos, con respecto de puntos de observación significativos vías de comunicación, núcleos de población, áreas de gran afluencia y lugares estratégicos por mostrar la singularidad del paisaje que se calificarán como principales o secundarios en función del número de observadores potenciales, de la distancia y de la duración de la visión, y la determinación del coeficiente de ponderación del valor de las unidades y de los recursos paisajísticos en función de su visibilidad, o coeficiente de visibilidad (v).*

*2.º A efectos de determinar la visibilidad del paisaje, el análisis visual se realizará a partir de los puntos de observación, hasta distancias baja (500 m), media (1.500 m) y alta (más de 1.500 m y hasta 3000 m, o superior) y distinguiendo las zonas visibles desde los mismos o cuencas visuales, de las no visibles, mediante técnicas informáticas sobre*



*cartografía a escala adecuada, pudiendo a tal efecto hacerse uso de las herramientas puestas a disposición pública por el Instituto Cartográfico Valenciano y apoyo de campo, y deberá documentarse con imágenes fotográficas panorámicas con la amplitud de ángulo y profundidad que se requiera en cada caso.*

*Según la calificación de los puntos de observación y de las zonas visibles desde estos, el análisis visual se sustancia en la siguiente calificación de los terrenos: zonas de máxima visibilidad, si son visibles desde algún punto de observación principal; zonas de visibilidad media, si son visibles desde más de la mitad de los puntos de observación secundarios; zonas de visibilidad baja, si son visibles desde menos de la mitad de los puntos de observación secundarios; y terrenos en sombra, si no son visibles desde ninguno de los puntos de observación considerados.*

*El coeficiente de visibilidad ( $v$ ) tiene por finalidad trasladar la calificación cualitativa de la visibilidad del territorio a términos cuantitativos, tomando la forma de un número racional comprendido en el intervalo [0 y 1].*

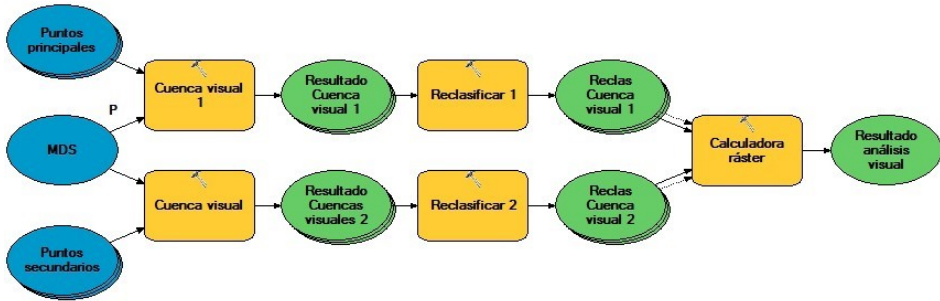
En la Comunitat Valenciana la valoración del paisaje se basa en la calidad determinada por dos componentes que ponderan por igual los mismos recursos y unidades paisajísticas: la calidad paisajística, otorgada por expertos según las cualidades del paisaje, y la preferencia de la población, evaluada con la realización de un plan de partición pública. La fragilidad que adquiere un papel secundario y relegado a la

incidencia efectiva de la visibilidad, interviene como un modulador de las calidades anteriores, en función del grado de visibilidad, determinado desde una serie de puntos de observación, de los recursos paisajísticos y de las unidades de paisaje (Galiana y Vallés, 2007).

Los puntos de observación necesarios para realizar el análisis corresponden a los recorridos escénicos, puntos de observación significativos y de los recursos paisajísticos del “Estudio de Paisaje de Navajas (Castellón)”. La altura de los puntos de observación se ha realizado según Galán (2011), siendo diferente para peatones (1,6 m), viajeros en coche (1,2 m) y viajeros en tren (2,5 m). La distancia máxima para el cálculo de la cuenca visual desde cada punto ha sido de 10 km.

El análisis visual se ha realizado con el programa ArcGIS 10.1, porque permite utilizar elementos vectoriales lineales (carreteras, senderos, vía de ferrocarril, etc.) como puntos de observación, con otros programas habría que tomar una serie de puntos en el elemento lineal.

Puesto que se han tenido que realizar tres análisis visuales cambiando únicamente el modelo digital, el proceso para la obtención del análisis visual se ha automatizado a partir de la aplicación “*Model Builder*”. Esta aplicación utiliza las herramientas del programa estableciendo unos flujos de trabajos en cadena, obteniendo sucesivamente una salida en la ejecución de cada herramienta.



**Figura 16.** Proceso en Model Builder del análisis visual

De cada punto de observación se ha realizado su cuenca visual según su altura de observación. El resultado de las cuencas visuales es un mapa binario donde 0 es no visible y 1 visible. Las cuencas visuales de los puntos principales se han reclasificado, asignándole a la zona visible valor 10, para distinguirlas de las cuencas de los puntos secundarios, ya que la normativa indica que son zonas de máxima visibilidad las que son visibles desde algún punto de observación principal.

Una vez reclasificados las capas se suman las cuencas visuales para obtener las zonas de visibilidad máxima, media, baja y las zonas de sombra según describe la metodología. El análisis visual de los Estudios de Paisaje de la Comunitat Valenciana utiliza un método de cuenca visual acumulada.

### 5.2.3.3 Concordancia de los análisis visuales

Posteriormente se realiza una comparación entre los análisis visuales realizados a partir de los modelos digitales utilizados actualmente y con el modelo digital de superficie para determinar el grado de concordancia existente entre ellos.

Para realizar la comparación se han utilizado dos métodos el índice estadístico de Kappa y el método por categorías ambos incluidos en el programa informático libre Map Comparison Kit (versión 3.0.5).

### 5.2.3.4 Índice de Kappa

Los modelos digitales y los análisis visuales han sido realizados con un tamaño de celda de 1 m, recortados con las dimensiones del municipio de Navajas y en formato ASCII para poder usarlos con el programa Map Comparison Kit.

El índice de Kappa es una medición de la similitud de dos mapas basados en una tabla de contingencia.  $P(A)$  es la proporción de casos en conformidad (correctamente localizados) y  $P(E)$  es la proporción de casos en conformidad que se esperan por azar. La fórmula de Kappa es la siguiente:

$$K = \frac{P(A) - P(E)}{1 - P(E)} \quad \text{Ecuación 5}$$

$K_{location}$  mide la similitud de la localización espacial de las categorías de los dos mapas comparados.  $P(max)$  proporciona la similitud máxima que se puede encontrar basada en el número total de celdas asignadas a cada categoría. La fórmula de  $K_{location}$  es la siguiente:

$$K_{location} = \frac{P(A) - P(E)}{P(max) - P(E)} \quad \text{Ecuación 6}$$

$K_{histo}$  mide la similitud cuantitativa de los dos mapas comparados.  $K_{histo}$  permite expresar K como una combinación de similitud en cantidad y ubicación, su fórmula se muestra a continuación.

$$K_{histo} = \frac{P(max) - P(E)}{1 - P(E)} \quad \text{Ecuación 7}$$

Para interpretar el valor de k se utiliza la escala siguiente (Landis y Koch, 1977)

**Tabla 3.** Escala de fuerza de concordancia según coeficiente de Kappa

<b>Coficiente de Kappa (k)</b>	<b>Fuerza de concordancia</b>
0	Pobre
0,001-0,20	Leve
0,21-0,40	Aceptable
0,41-0,60	Moderada
0,61-0,80	Considerable
0,81-100	Casi Perfecta

### **5.2.3.5 Comparación por categorías**

El método por categoría realiza una comparación celda por celda del modelo ráster con respecto a una categoría (seleccionada por el usuario). Este método de comparación se basa en la tabla de contingencia, que recoge la distribución cruzada de las categorías de ambos mapas. Este método se ha calculado automáticamente a partir del programa Map Comparison Kit.

### **5.2.4 Análisis visual para estudios de integración paisajística a partir de un modelo digital de superficie obtenido de datos LiDAR**

Para analizar el impacto visual de actuaciones en el medio físico como edificios o parques eólicos frecuentemente se utiliza la visibilidad inversa en la mayoría de los casos, que consiste en realizar la cuenca visual tomando como punto de observación la actuación, donde se obtienen las zonas visibles o no visibles a las que afecta la actuación.

En el caso de la normativa de los Estudios de integración paisajística de la Comunitat Valenciana se requiere calcular el análisis visual a partir de un método que utiliza la cuenca visual acumulada. Para obtener este tipo de cuenca visual de varios puntos de observación en concreto habría que realizar la cuenca visual a partir de ellos hacia la actuación, y no al revés. El problema de aplicar esta metodología consiste a que la actuación no se encuentra incorporada en el modelo digital del terreno,

con lo que el resultado de la cuenca visual obtenida mostraría las zonas visibles y no visible a nivel del suelo.

En otros estudios de impacto visual sobre el planeamiento de nuevos edificios o parques eólicos también se realizan cuencas visuales a partir de modelo digitales del terreno en los que no están incluidas la vegetación, las construcciones, ni otros elementos superficiales del medio físico. Actualmente aprovechando el aumento de la disponibilidad de los datos LiDAR para la realización de modelos digitales de superficie de alta resolución se pueden realizar análisis visuales más precisos.

En este apartado de la investigación se propone una metodología para el análisis de un edificio a partir de la cuenca visual de identificación generada (Danese *et al.*, 2009, 2011) a partir de un modelo digital de superficie procedente de datos LiDAR. El sistema de información geográfica utilizado ha sido ArcGIS 10.1.

#### **5.2.4.1 Adición del edificio propuesto en los modelos digitales de superficie**

En primer lugar, el edificio propuesto se ha incluido en el modelo digital de superficie realizado con el método de interpolación Topo a ráster y resolución 1 m, mientras que en el modelo digital de superficie urbana (2,5-DUSM) del municipio de Navajas.

El edificio tiene una planta rectangular de 18 x 10 m y una altura de 24 m. Para incluir el edificio en el modelo digital de superficie se ha creado su planta en formato vectorial *shapefile* de Esri en la ubicación donde se ha planteado realizarlo. Posteriormente se ha transformado a formato ráster con resolución de 1 metro y reclasificado con un valor de 24 m de altura para poder ser incluido en los modelos digitales utilizados. El edificio se ha incluido en los modelos digitales con la herramienta “Calculadora de ráster” del programa ArcGIS 10.1.

#### **5.2.4.2 Determinación de la cuenca visual de identificación**

El análisis visual se realizó con la herramienta “*Observer Points*” del programa ArcGIS 10.1, utilizando la capa vectorial que incluye los 10 puntos de observación utilizados con una altura de 1,6 m, esta herramienta puede incluir un máximo de 16 puntos de observación a la vez.

La cuenca visual de identificación se realizó MDS y 2,5-DUSM con el objetivo de establecer diferencias entre ellos. Una vez realizadas las cuencas visuales de identificación a partir de cada modelo digital, las capas rásters obtenidas se cortan respecto a la superficie del edificio para poder obtener las celdas en dichos modelos que corresponden a cada punto de observación. Para determinar en qué puntos es visible o no el edificio la tabla de atributos se ha sumado, donde el edificio es visible donde se obtiene un valor distinto de 0. Finalmente se comparan los resultados realizados a partir de cada modelo digital.



## **6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**



## **6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### **6.1 Resultados de la creación de modelos digitales de superficie (MDS)**

#### **6.1.1 Precisión de los modelos digitales de superficie**

Al procesar los métodos de interpolación en el programa ArcGIS 10.1 dos de ellos, Spline y Kriging ocasionaron un error en el programa y no se ejecutaron las herramientas, el error se produjo aplicando las diferentes resoluciones del tamaño de celda a la hora de obtener el modelo digital de superficie. Para comprobar que las herramientas de estos métodos de interpolación funcionaban en el programa ArcGIS se realizó una prueba con una capa en formato shapefile ESRI, obtenida a partir de la capa de la zona de estudio, con menor tamaño de malla ráster. De este modo sí se obtuvo el modelo digital de superficie por lo que se pudo comprobar que para estos dos métodos con tal cantidad de puntos y un ordenador con las características del utilizado no es posible obtener la interpolación del modelo digital de superficie.

Los métodos de interpolación utilizados finalmente para realizar los modelos digitales de superficie fueron, Topo a ráster, TIN a ráster, De punto a ráster, IDW y Vecino natural con resoluciones de tamaño de celda de la malla de 1, 2, 5 y 10 m. La precisión de los modelos digitales de superficie de cada método de interpolación y tamaño de celda de la malla se evaluó a partir del cálculo del error medio cuadrático y del error

medio absoluto. De la capa de puntos de datos LiDAR se extrajeron al azar el 5% del total de los puntos (319.859 de un total de 6.397.180 puntos) para compararlos con los de la malla obtenida por cada método de interpolación se calculó el error medio cuadrático y el error medio absoluto, estos son índices estadísticos de precisión debido a que se utilizan para evaluar una muestra representativa de un conjunto de datos para determinar de la exactitud de la malla del modelo digital de superficie interpolado. El error medio cuadrático y el error medio absoluto se calcularon comparando la elevación real extraída de los datos LiDAR y las elevaciones de los puntos seleccionados al azar. De esta operación se obtuvieron 20 resultados según el método de interpolación y la resolución espacial utilizada.

Los resultados obtenidos del análisis estadístico realizado con el programa Stat Graphics para determinar la precisión de los métodos de interpolación con cuatro tamaños de celda diferentes se muestran en la tabla siguiente:

Tabla 4. Error medio absoluto y error medio cuadrático

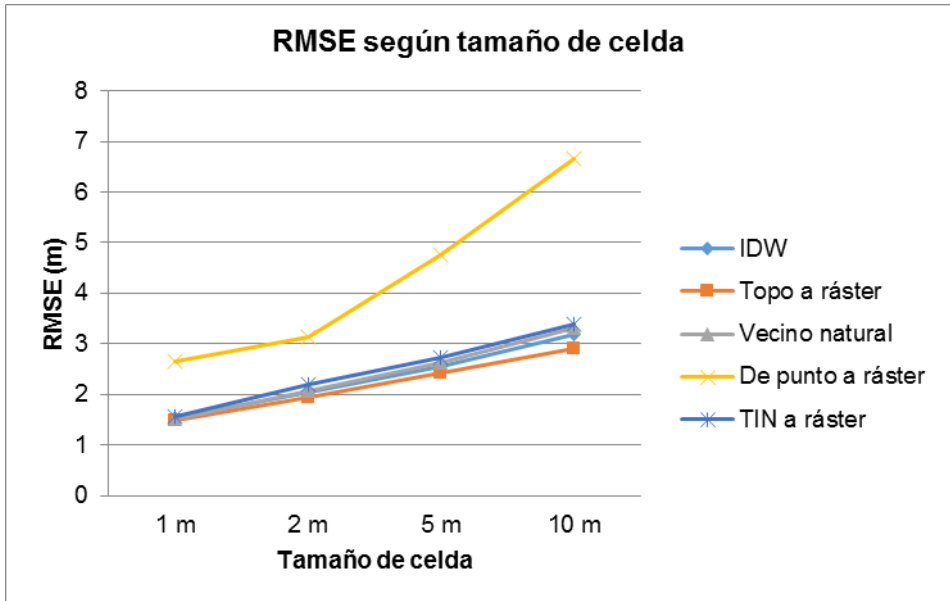
Metodo de interpolación	Resolución (m)	Error mínimo (m)	Error máximo (m)	Desviación típica	Error absoluto medio (m)	Error medio cuadrático (m)
Topo a ráster	1	-28,40	32,92	1,49	0,66	1,50
TIN a ráster	1	-33,32	45,02	1,59	0,68	1,60
IDW	1	-35,90	37,14	1,51	0,68	1,51
De punto a ráster	1	-55,46	48,20	2,66	1,20	2,66
Vecino natural	1	-37,44	39,63	1,54	0,69	1,54
Topo a ráster	2	-36,38	33,66	1,96	1,05	1,96
TIN a ráster	2	-45,52	45,97	2,19	1,04	2,19
IDW	2	-41,57	45,97	2,02	1,00	2,02
De punto a ráster	2	-55,35	48,89	2,94	1,54	3,03
Vecino natural	2	-45,00	40,87	2,11	1,02	2,11
Topo a ráster	5	-49,43	29,64	2,48	1,58	2,48
TIN a ráster	5	-50,52	48,58	2,80	1,51	2,80
IDW	5	-47,74	44,73	2,61	1,46	2,61
De punto a ráster	5	-44,65	54,43	3,65	2,84	4,37
Vecino natural	5	-50,68	48,58	2,72	1,49	2,72
Topo a ráster	10	-49,98	30,19	3,01	2,01	3,01
TIN a ráster	10	-54,93	53,70	3,36	1,99	3,36
IDW	10	-45,60	43,01	3,20	1,93	3,20
De punto a ráster	10	-44,56	55,79	4,48	4,43	6,09
Vecino natural	10	-54,85	53,38	3,29	1,97	3,29

En la tabla 4 se observa que tanto el error medio absoluto como el error medio cuadrático aumentan al igual que aumenta el tamaño de celda que se ha utilizado para la creación del modelo digital de superficie. El rango de error medio absoluto se encuentra entre los 0,66 y los 4,9 m, y el error medio cuadrático entre los 1,50 y los 6,67 m, estos errores incrementan en todos los métodos de interpolación cuando la resolución espacial aumenta de 1 a 10 m. El error medio absoluto también varió según el método de interpolación utilizado y la resolución. Los rangos de error más grandes fueron en los obtenidos en el método de interpolación De punto a ráster.

Con tamaño de celda de 1 m las diferencias entre el error medio absoluto son muy pequeñas en todos los métodos de interpolación utilizados, excepto en el caso del método de interpolación De punto a ráster. El error más bajo obtenido a resolución de 1 m ha sido el método de interpolación Topo a ráster.

En cuanto al tamaño de celda de 2 m el menor valor ha sido obtenido por el método de interpolación IDW, siendo el valor muy parecido entre sí excepto el método de interpolación De punto a ráster al igual que con el tamaño de celda de 1m.

En el gráfico siguiente se muestra el RMSE respecto el tamaño de celda.



**Figura 17.** Error medio cuadrático según tamaño de celda

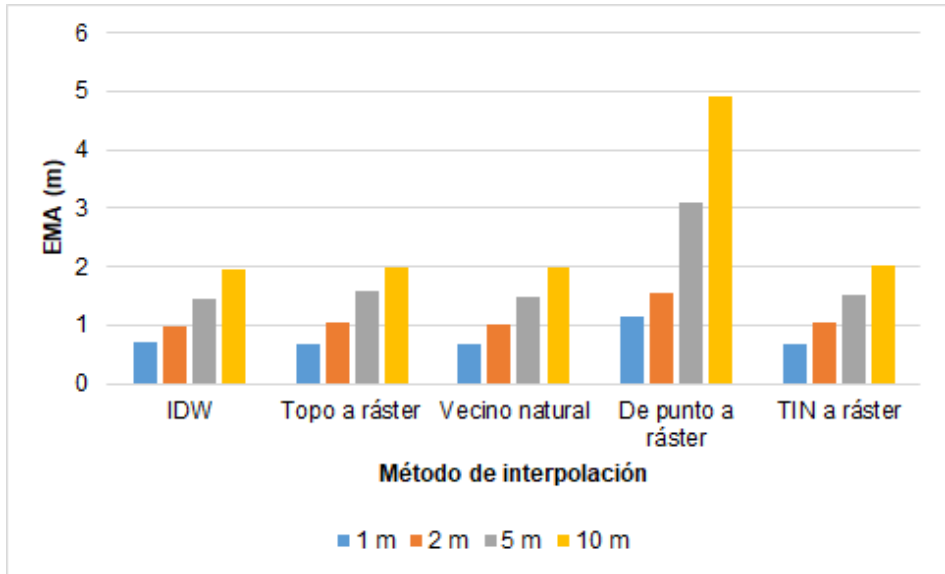


Figura 18. Error medio cuadrático según método de interpolación

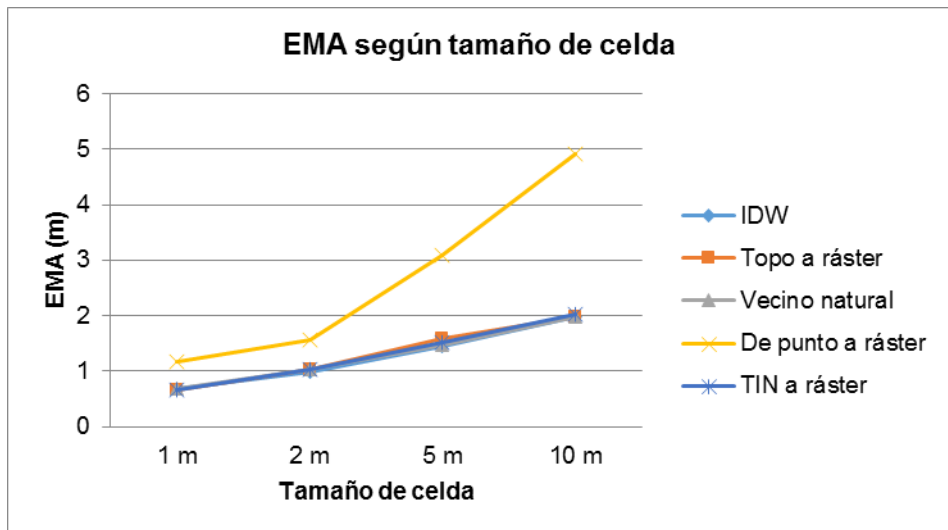
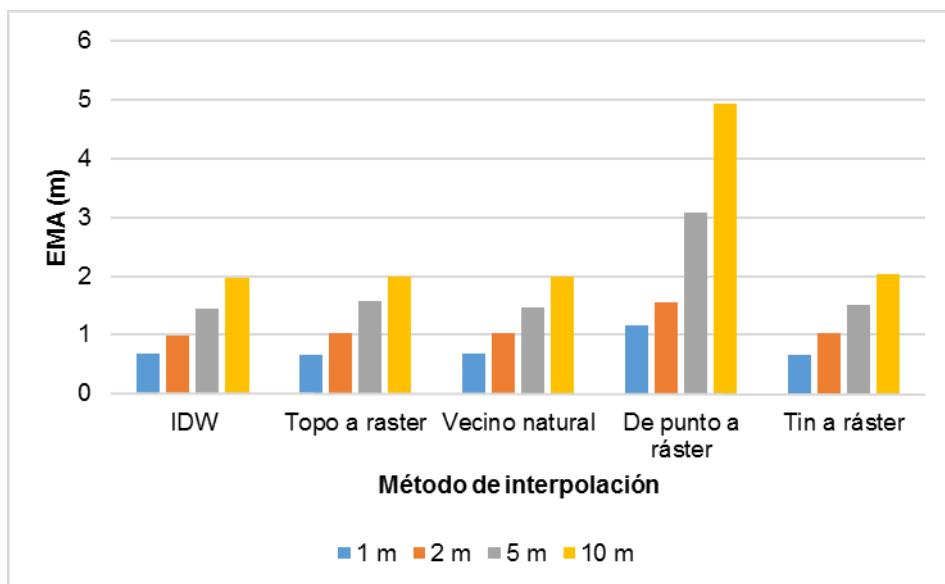


Figura 19. Error medio absoluto según tamaño de celda





**Figura 20.** Error medio absoluto según método de interpolación

Los RMSE y EMA aumentaron al disminuir la resolución de celda, obteniendo un error más bajo en el método de interpolación Topo a ráster con todos los tamaños de celda utilizados, siendo la diferencia muy pequeña respecto al método de Vecino natural. El método de interpolación que más error produjo fue el método De punto a ráster, que fue el método que se realizó con el programa FUSION.

En los gráficos de la Figura 19 se observa que el error medio absoluto y del error medio cuadrático aumentan linealmente al igual que disminuye la resolución en los métodos de interpolación que se han realizado con el programa ArcGIS 10.1, exceptuando en los obtenidos por el método

de interpolación De punto a ráster, que se obtuvo a partir del programa FUSION 3.0.5.

### **6.1.2 Resultados comparación entre cuencas visuales realizadas con cada método de interpolación**

En cuanto a la correlación entre las cuencas visuales realizadas, se ha obtenido mayor correlación en la comparación de las cuencas visuales realizadas con los modelos digitales de superficie TIN a ráster y Vecino natural con resolución de 1 m, encontrándose el valor de coeficiente de correlación entre 0,8 y 0,9 para todos los puntos, excepto en el punto 2, la segunda comparación con coeficientes de correlación más elevados ha sido Topo a ráster y TIN a ráster. En las demás resoluciones la correlación disminuye respecto al coeficiente de correlación realizado con tamaño de celda de 1 m, excepto en la comparación Topo a ráster – Punto a ráster a resoluciones de 2, 5 y 10 m y las comparaciones IDW - TIN a ráster, Topo a ráster – IDW, IDW - TIN a ráster y TIN a ráster - Vecino natural, todas ellas a resolución de 5m.

El Anexo I recoge los gráficos de todas las comparaciones entre la cuenca visual de todos los métodos realizados.

### 6.1.3 Resultados Perfiles longitudinales

Los perfiles longitudinales realizados en distintas secciones según el uso del suelo siguen el mismo comportamiento, se puede observar en todos ellos que a menor resolución del modelo digital de superficie el perfil se va suavizando en mayor medida. También se puede observar que las cotas más bajas aumentan y las cotas más altas disminuyen, según aumenta el tamaño de celda. Este comportamiento afecta a la realización de la cuenca visual ya que al tomar un punto de observación en el modelo digital de superficie en el que ha aumentado/disminuido su cota de forma excesiva, la precisión de la cuenca visual disminuiría.

En los perfiles realizados en las zonas agrícolas y forestales se observa que los árboles aparecen como montículos en el modelo digital de superficie a resoluciones de 1 y 2 m, mientras que a resoluciones menores de 5 y 10 m se observa que el detalle de los árboles ha desaparecido. Los tamaños de celda mayores (5 y 10 m) han suavizado el modelo digital de superficie y la presencia de dichos árboles pasa desapercibida. Respecto a los perfiles de los edificios de las zonas urbanas ocurre lo mismo que para las zonas agrícolas y forestales, ya que a tamaños de celda de 5 y 10 m la presencia de edificios ya no se distingue en el perfil realizado. A continuación se muestran los distintos perfiles realizados para cada zona.



Figura 21. Segmento del perfil agrícola 1

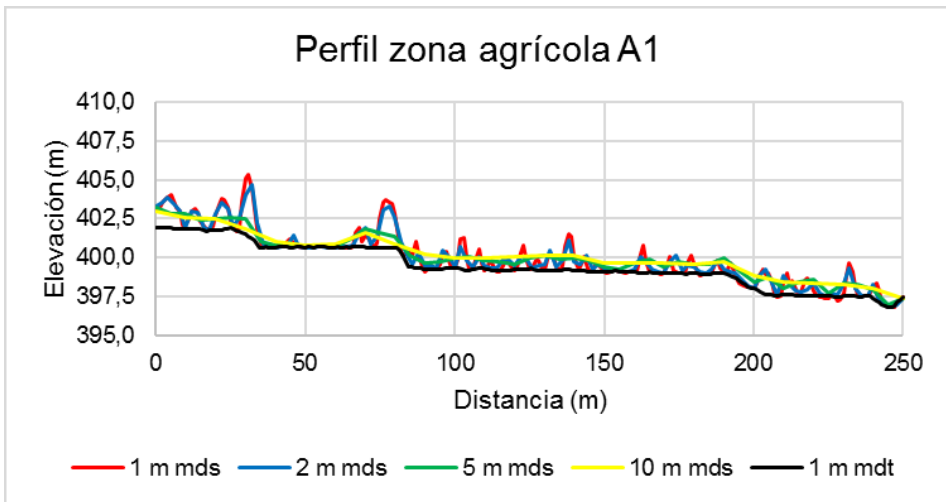
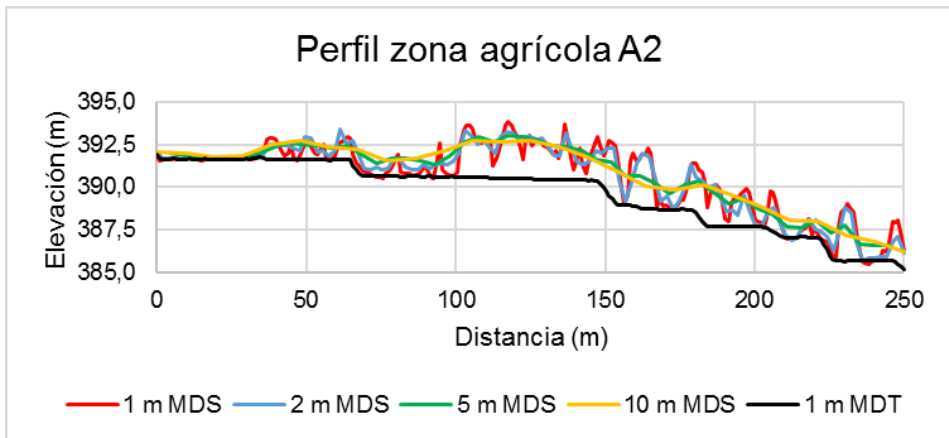


Figura 22. Perfil zona agrícola A1



**Figura 23.** Segmento del perfil agrícola 2



**Figura 24.** Perfil zona agrícola A2



Figura 25. Segmento del perfil forestal 1

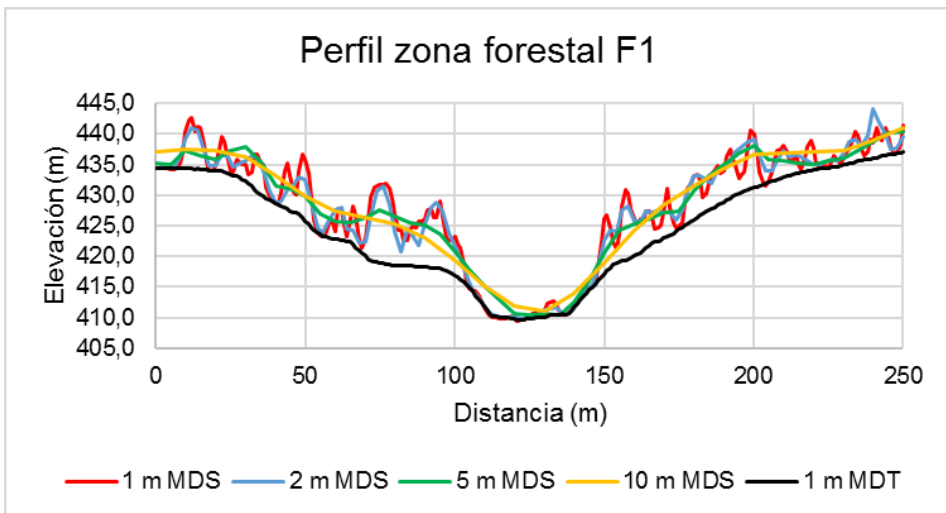
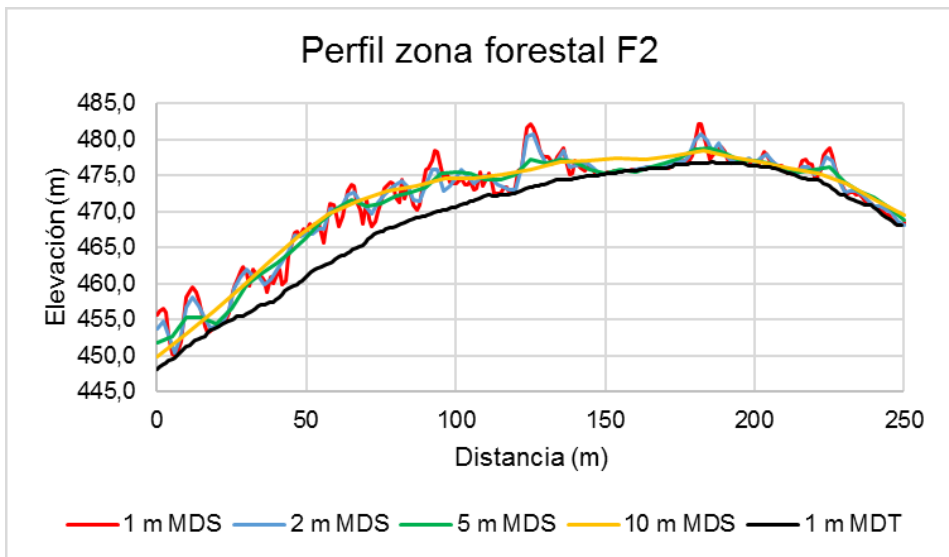


Figura 26. Perfil zona forestal F1



**Figura 27.** Segmento del perfil forestal 2



**Figura 28.** Perfil zona forestal F2



Figura 29. Segmento del perfil urbano 1

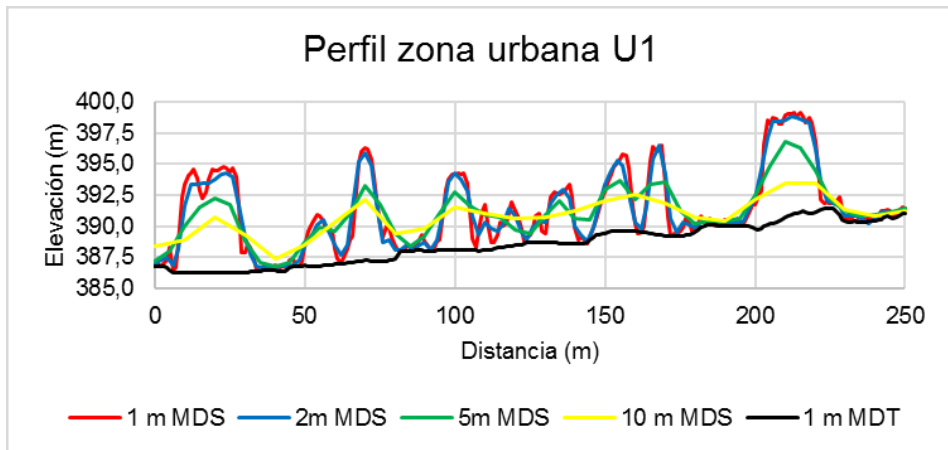
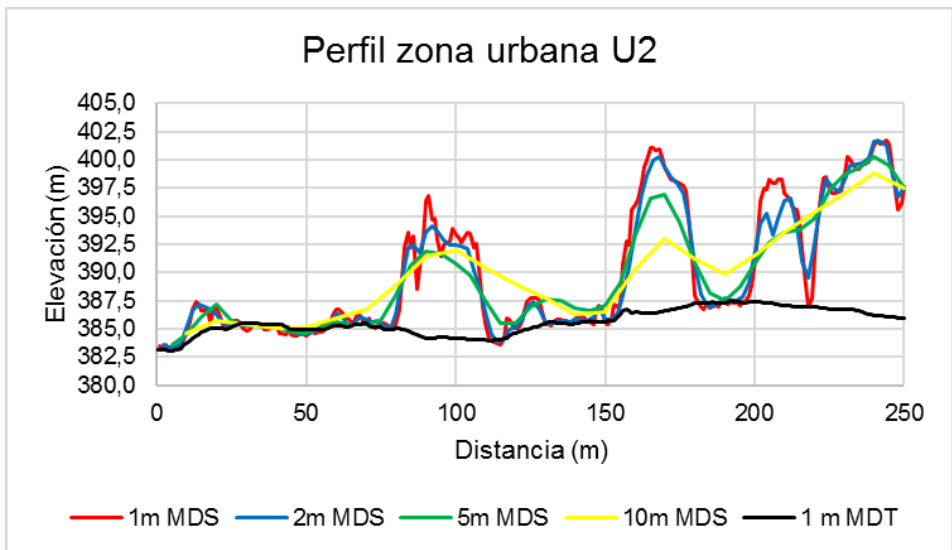


Figura 30. Perfil zona urbano U1





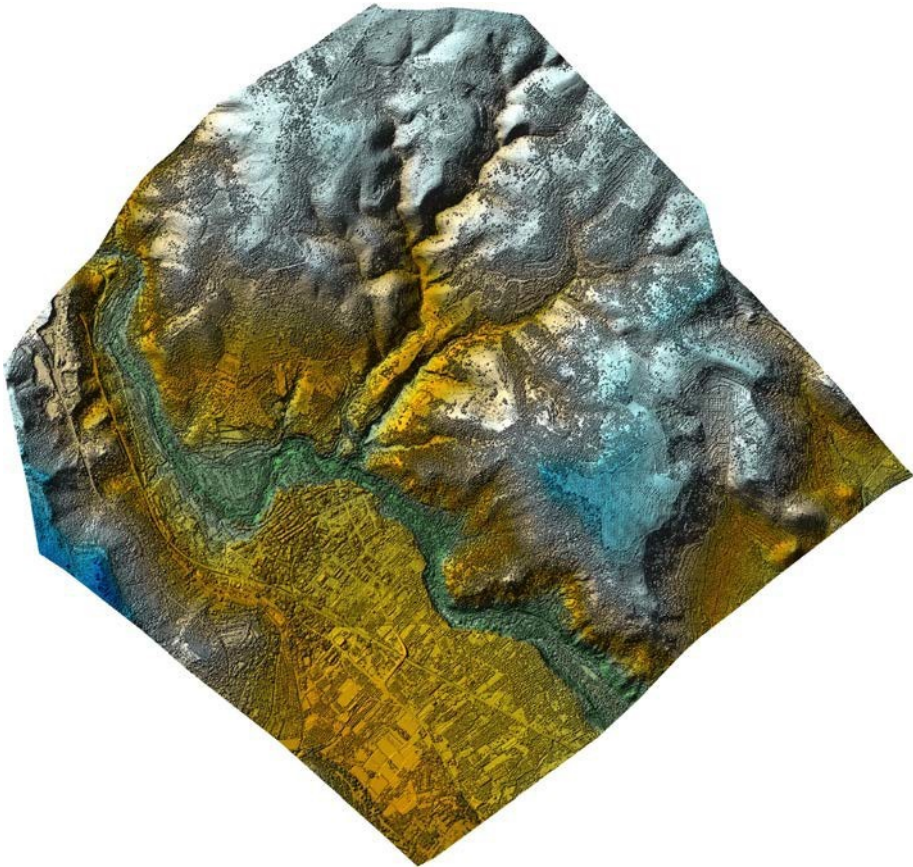
**Figura 31.** Segmento del perfil urbano 2



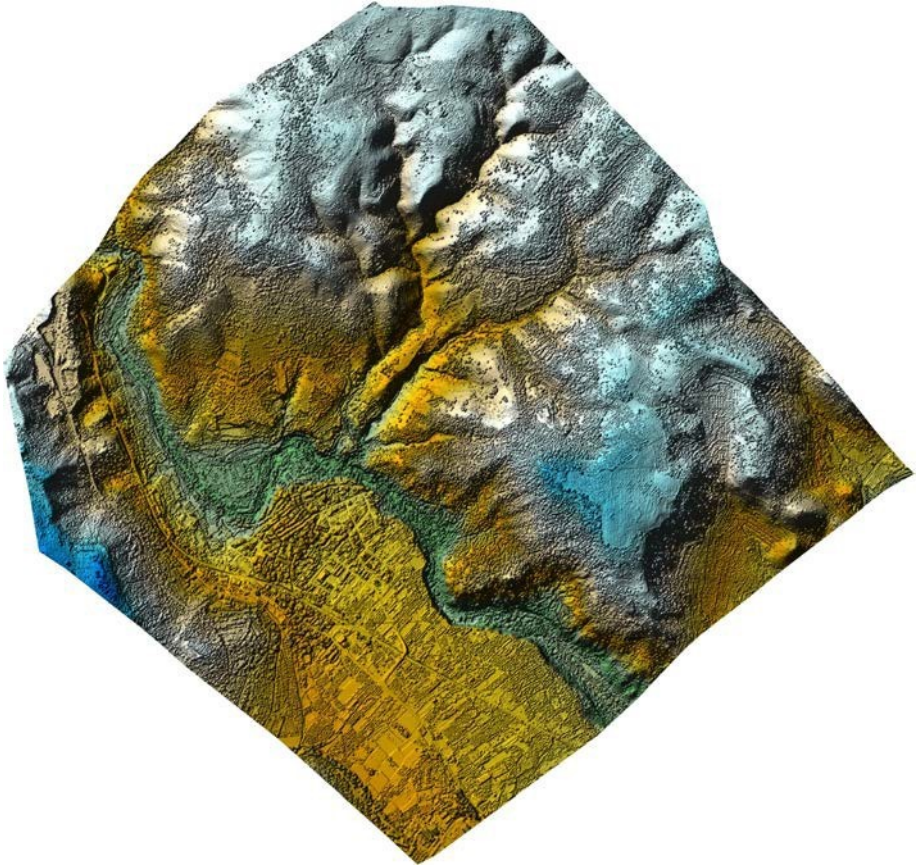
**Figura 32.** Perfil zona urbano U2

A continuación (Figuras 33, 34, 35 y 36) se muestran los modelos digitales de superficie del municipio de Navajas realizado con el método

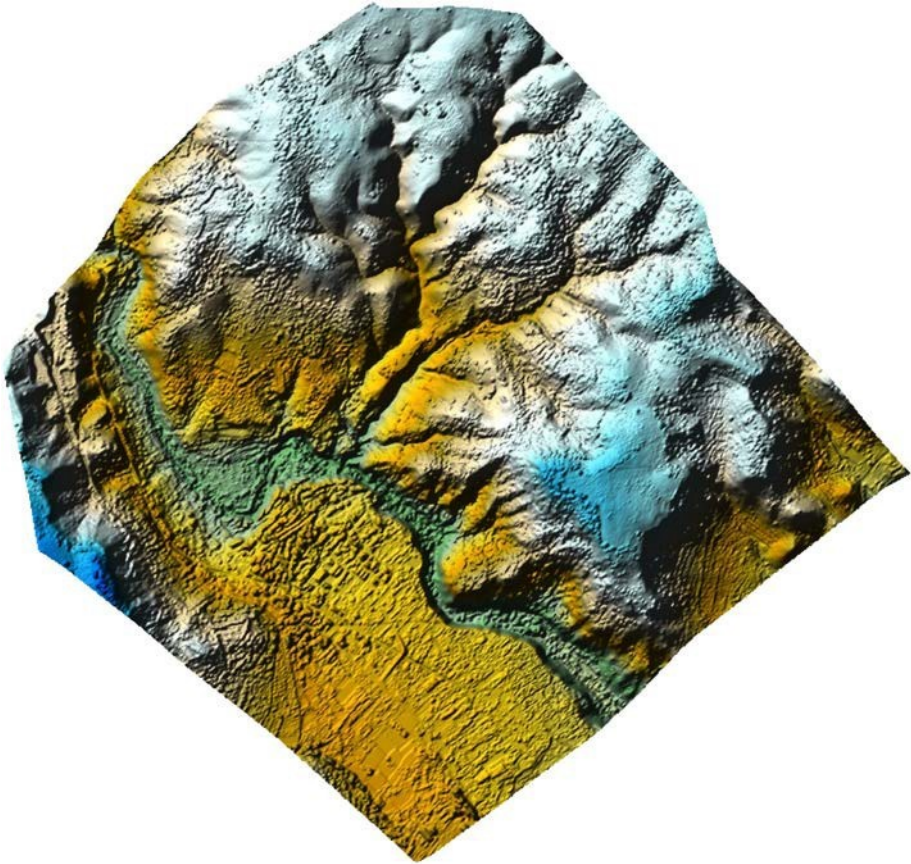
de interpolación más preciso Topo a ráster con los diferentes tamaños de celda (1, 2, 5 y 10 m).



**Figura 33.** Modelo digital de superficie con resolución de 1 m



**Figura 34.** Modelo digital de superficie con resolución de 2 m



**Figura 35.** Modelo digital de superficie con resolución de 5 m

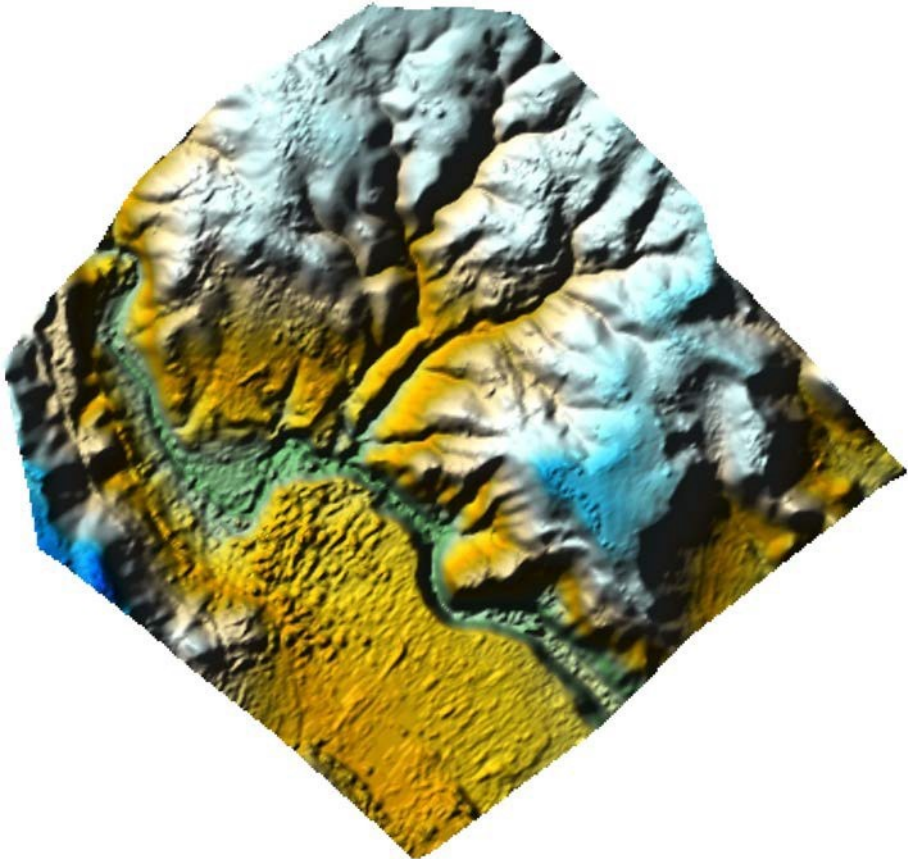


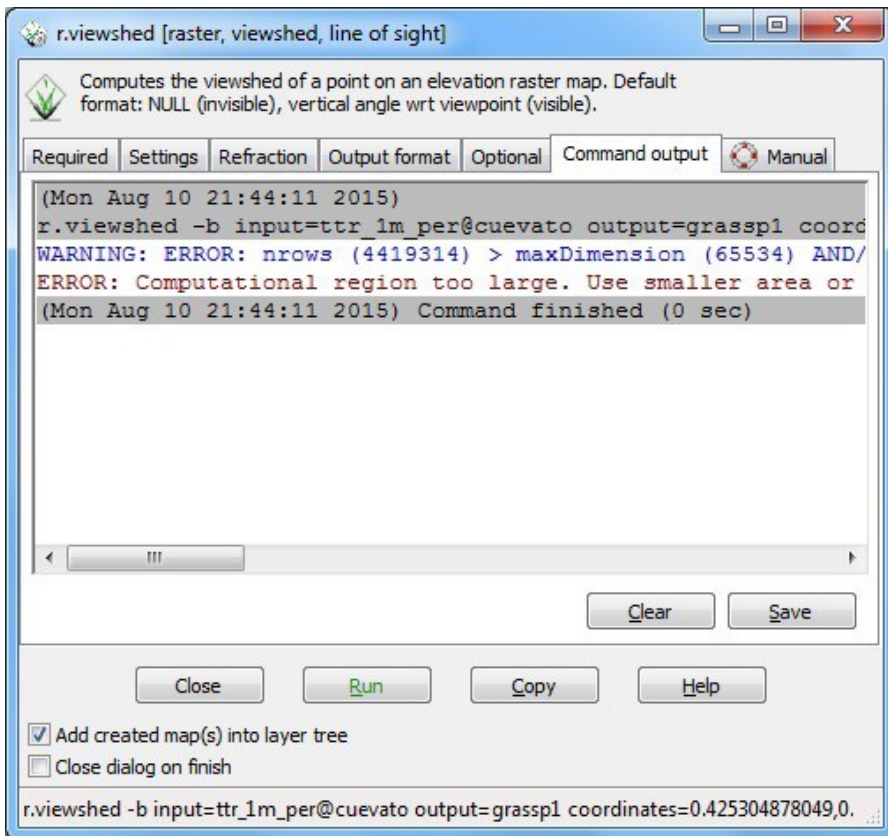
Figura 36. Modelo digital de superficie con resolución de 10 m

## **6.2 Resultados de la comparación de la cuenca visual realizada a partir de distintos sistemas de información geográfica**

### **6.2.1 Diferencias entre programas**

En todos los programas se ha podido realizar la cuenca visual excepto en el programa GRASS. El programa GRASS no admite un tamaño de

archivo ráster superior a 65.534 filas y 65.534 columnas (Figura 37), por lo que la realización de la cuenca visual para la evaluación del paisaje a la escala de este estudio no es posible con este programa, siempre y cuando el tamaño de celdas y columnas superen los valores anteriormente indicados.



**Figura 37.** Error producido en GRASS

El programa QGIS es el genera cuencas visuales más grandes para todos los puntos, ya que se han obtenido mayor número de celdas

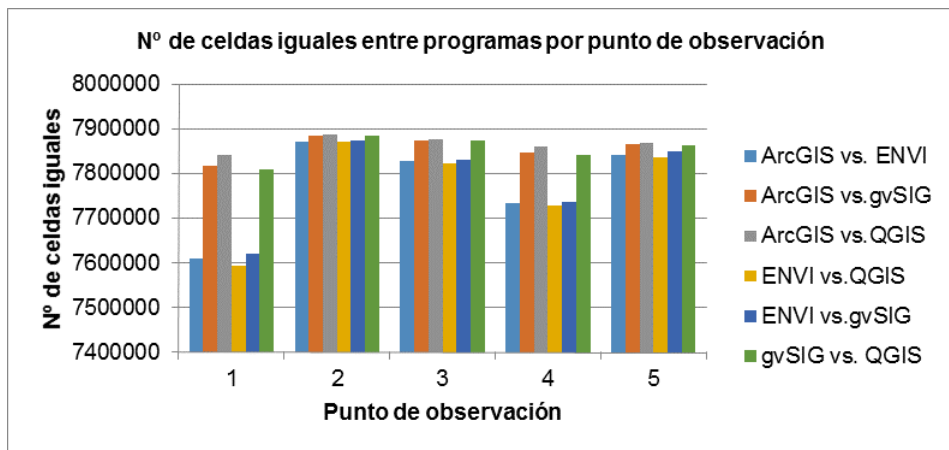
visibles, en segundo lugar se encuentra el programa ArcGIS y en tercer y cuarto lugar gvSIG y ENVI respectivamente (ver Tabla 5), en las figuras del Anexo II puede verse la representación gráfica de las cuencas visuales de cada punto con cada programa utilizado.

**Tabla 5.** Número de celdas visibles

<b>Punto de observación</b>	<b>ArcGIS</b>	<b>ENVI</b>	<b>gvSIG</b>	<b>QGIS</b>
<b>1</b>	444203	182841	425074	466345
<b>2</b>	19407	903	17936	21353
<b>3</b>	65054	3846	63215	71860
<b>4</b>	286759	146094	273446	296311
<b>5</b>	131110	87526	119164	137263

**Tabla 6.** N° de celdas iguales entre programas

	<b>ArcGIS vs. ENVI</b>	<b>ArcGIS vs.gvSIG</b>	<b>ArcGIS vs.QGIS</b>	<b>ENVI vs.QGIS</b>	<b>ENVI vs.gvSIG</b>	<b>gvSIG vs. QGIS</b>
	<b>N° de celdas</b>	<b>N° de celdas</b>	<b>N° de celdas</b>	<b>N° de celdas</b>	<b>N° de celdas</b>	<b>N° de celdas</b>
<b>1</b>	7608360	7816759	7840809	7594031	7621348	7808398
<b>2</b>	7871503	7884700	7887125	7870373	7873638	7884846
<b>3</b>	7828710	7874367	7877224	7822777	7830766	7874126
<b>4</b>	7733365	7845683	7859512	7729274	7735385	7842746
<b>5</b>	7841097	7866185	7868034	7836098	7850207	7864114



**Figura 38.** Nº de celdas iguales entre programas por punto de observación

El resultado de la comparación ArcGIS-QGIS proporciona el mayor número de celdas iguales, seguido de la comparación entre gvSIG-QGIS, siendo el porcentaje de celdas iguales en ambos casos superior al 99% (Tabla 9). Las comparaciones del porcentaje de número de celdas iguales realizadas con el programa ENVI y los otros programas son las que tienen porcentajes menores al 99% en las cuencas visuales de los puntos de observación 1 y 4 (Tabla 7,9,10 y 11).



Tabla 7. N° de celdas iguales y diferentes ArcGIS vs. ENVI

<b>ArcGIS vs. ENVI</b>				
<b>Celdas</b>	<b>Iguales</b>		<b>Diferentes</b>	
<b>Punto de observación</b>	<b>N°</b>	<b>%</b>	<b>N°</b>	<b>%</b>
<b>1</b>	7.608.360	96,43	28.1688	3,57
<b>2</b>	7.871.503	99,76	1.8545	0,24
<b>3</b>	7.828.710	99,22	6.1338	0,78
<b>4</b>	7.733.365	98,01	15.6683	1,99
<b>5</b>	7.841.097	99,38	48.951	0,62

Tabla 8. N° de celdas iguales y diferentes ArcGIS vs. gvSIG

<b>ArcGIS vs. gvSIG</b>				
<b>Celdas</b>	<b>Iguales</b>		<b>Diferentes</b>	
<b>Punto de observación</b>	<b>N°</b>	<b>%</b>	<b>N°</b>	<b>%</b>
<b>1</b>	7.816.759	99,07	73.289	0,94
<b>2</b>	7.884.700	99,93	5.348	0,07
<b>3</b>	7.874.367	99,80	15.681	0,20
<b>4</b>	7.845.683	99,44	44.365	0,57
<b>5</b>	7.866.185	99,70	23.863	0,30

Tabla 9. N° de celdas iguales y diferentes ENVI vs. QGIS

<b>ArcGIS vs. QGIS</b>				
<b>Celdas</b>	<b>Iguales</b>		<b>Diferentes</b>	
<b>Punto de observación</b>	<b>N°</b>	<b>%</b>	<b>N°</b>	<b>%</b>
<b>1</b>	7.840.809	99,38	49.239	0,62
<b>2</b>	7.887.125	99,96	2.923	0,04
<b>3</b>	7.877.224	99,84	12.824	0,16
<b>4</b>	7.859.512	99,61	30.536	0,39
<b>5</b>	7.868.034	99,72	22.014	0,28

**Tabla 10.** N° de celdas iguales y diferentes ENVI vs. QGIS

<b>ENVI vs. QGIS</b>				
<b>Celdas</b>	<b>Iguales</b>		<b>Diferentes</b>	
<b>Punto de observación</b>	<b>N°</b>	<b>%</b>	<b>N°</b>	<b>%</b>
<b>1</b>	7.594.031	96,24	296.796	3,76
<b>2</b>	7.870.373	99,74	20.454	0,26
<b>3</b>	7.822.777	99,14	68.050	0,86
<b>4</b>	7.729.274	97,95	161.553	2,05
<b>5</b>	7.836.098	99,31	54.729	0,69

**Tabla 11.** N° de celdas iguales y diferentes ENVI vs. gvSIG

<b>ENVI vs. gvSIG</b>				
<b>Celdas</b>	<b>Iguales</b>		<b>Diferentes</b>	
<b>Punto de observación</b>	<b>N°</b>	<b>%</b>	<b>N°</b>	<b>%</b>
<b>1</b>	7.621.348	96,58	269.479	3,42
<b>2</b>	7.873.638	99,78	17.189	0,22
<b>3</b>	7.830.766	99,24	60.061	0,76
<b>4</b>	7.735.385	98,03	155.442	1,97
<b>5</b>	7.850.207	99,49	40.620	0,51

**Tabla 12.** N° de celdas iguales y diferentes gvSIG vs. QGIS

<b>gvSIG vs. QGIS</b>				
<b>Celdas</b>	<b>Iguales</b>		<b>Diferentes</b>	
<b>Punto de observación</b>	<b>N°</b>	<b>%</b>	<b>N°</b>	<b>%</b>
<b>1</b>	7.808.398	98,96	82.429	1,04
<b>2</b>	7.884.846	99,92	5.981	0,08
<b>3</b>	7.874.126	99,79	16.701	0,21
<b>4</b>	7.842.746	99,39	48.081	0,61
<b>5</b>	7.864.114	99,66	26.713	0,34

**Tabla 13.** Coeficientes de correlación de las cuencas visuales según programa

<b>Coeficientes de correlación de las cuencas visuales según programa</b>						
<b>Punto de observación</b>	<b>ArcGIS vs. ENVI</b>	<b>ArcGIS vs. gvSIG</b>	<b>ArcGIS vs. QGIS</b>	<b>ENVI vs. QGIS</b>	<b>ENVI vs. gvSIG</b>	<b>GvSIG vs. QGIS</b>
<b>1</b>	0,59339	0,91096	0,94288	0,59463	0,59079	0,9031
<b>2</b>	0,20924	0,85682	0,9289	0,20473	0,20492	0,85063
<b>3</b>	0,23801	0,87682	0,90664	0,22344	0,22926	0,87712
<b>4</b>	0,66696	0,91812	0,94572	0,65271	0,66730	0,91325
<b>5</b>	0,78935	0,90415	0,91679	0,81073	0,77288	0,89642

**Tabla 14.** Porcentaje de celdas diferentes

	<b>ArcGIS vs. ENVI</b>	<b>ArcGIS vs. gvSIG</b>	<b>ArcGIS vs. QGIS</b>	<b>ENVI vs. QGIS</b>	<b>ENVI vs. gvSIG</b>	<b>gvSIG vs. QGIS</b>
<b>Puntos de observación</b>	<b>%</b>	<b>%</b>	<b>%</b>	<b>%</b>	<b>%</b>	<b>%</b>
<b>1</b>	3,57	0,94	0,62	3,76	3,42	1,04
<b>2</b>	0,24	0,07	0,04	0,26	0,22	0,08
<b>3</b>	0,78	0,20	0,16	0,86	0,76	0,21
<b>4</b>	1,99	0,57	0,39	2,05	1,97	0,61
<b>5</b>	0,62	0,30	0,28	0,69	0,51	0,34

Respecto a los resultados de celdas diferentes se observa que la comparación de los programas ArcGIS y QGIS tiene los porcentajes más bajos para todos los puntos de observación, seguidos de la comparación entre ArcGIS y gvSIG, mientras que los porcentajes más altos con celdas diferentes se encuentran en las comparaciones de ENVI con QGIS y ArcGIS con ENVI.

En el Anexo III se representan en mapas las celdas iguales y diferentes entre programas por cada punto de observación.

## 6.2.2 Tiempo de procesamiento

El tiempo de procesamiento es importante a la hora de planificarse en la realización de los estudios de paisaje y estudios de integración paisajística, ya que la utilización de un programa u otro en la obtención de la cuenca visual puede demorar en el tiempo de las siguientes fases que dependan del análisis de la cuenca visual. El programa más rápido en calcular la cuenca visual ha sido ArcGIS con 7,38 segundos (0,123 minutos) de media, seguido del programa ENVI con 22,8 segundos (0,380 minutos) y del programa QGIS con 5 minutos y 4 segundos. El programa más lento en generar la cuenca ha sido el programa gvSIG con 80 minutos y 56 segundos de media.

**Tabla 15.** Tiempos de procesamiento en la generación de las cuencas visuales

<b>Tiempo de procesamiento en la generación de las cuencas visuales (minutos)</b>				
<b>Punto de observación</b>	<b>ArcGIS</b>	<b>gvSIG</b>	<b>ENVI</b>	<b>QGIS</b>
<b>1</b>	0,167	81,5	0,417	5,200
<b>2</b>	0,117	80,783	0,367	4,933
<b>3</b>	0,117	81,400	0,367	5,033
<b>4</b>	0,117	80,065	0,367	5,100
<b>5</b>	0,117	80,35	0,367	5,333
<b>Tiempo medio</b>	0,123	80,937	0,380	5,067

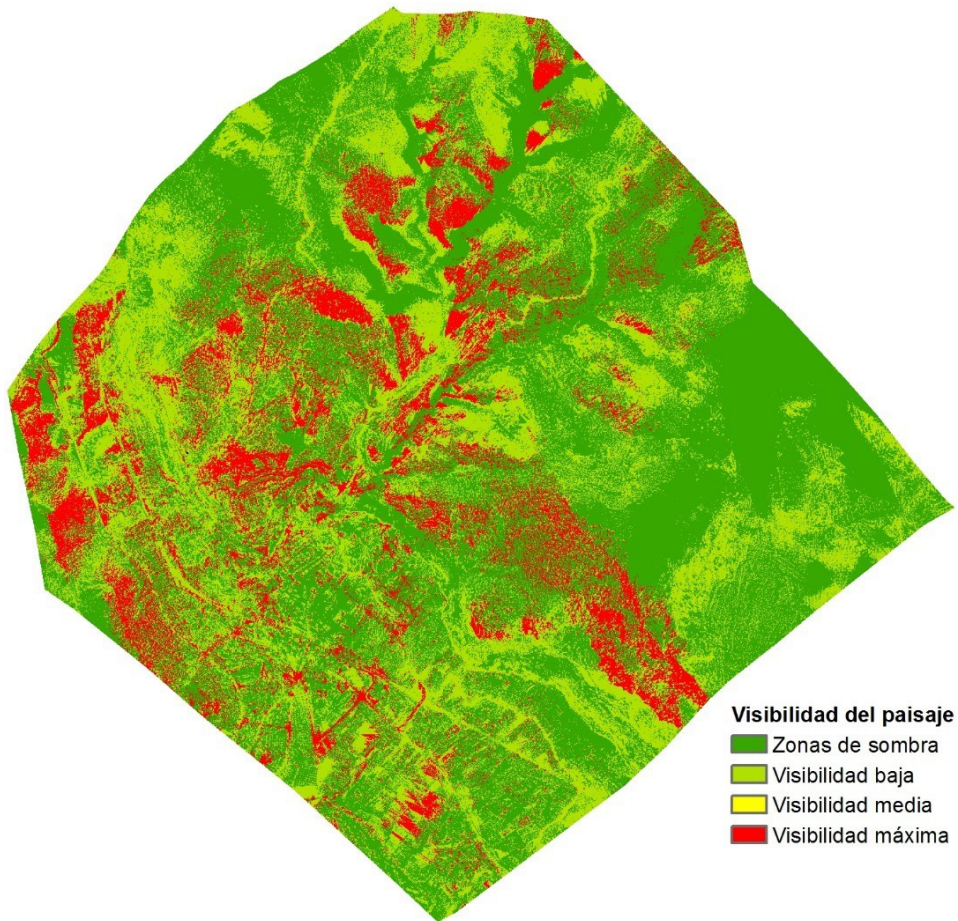
En los resultados se observa que los programas comerciales (ArcGIS y ENVI) son más rápidos en la generación de la cuenca visual que los programas gratuitos (gvSIG y QGIS). La diferencia entre el tiempo medido obtenido en la generación de la cuenca visual entre los

programas comerciales es pequeña (15,42 segundos) mientras que para los programas gratuitos es muy elevada (75,27 minutos).

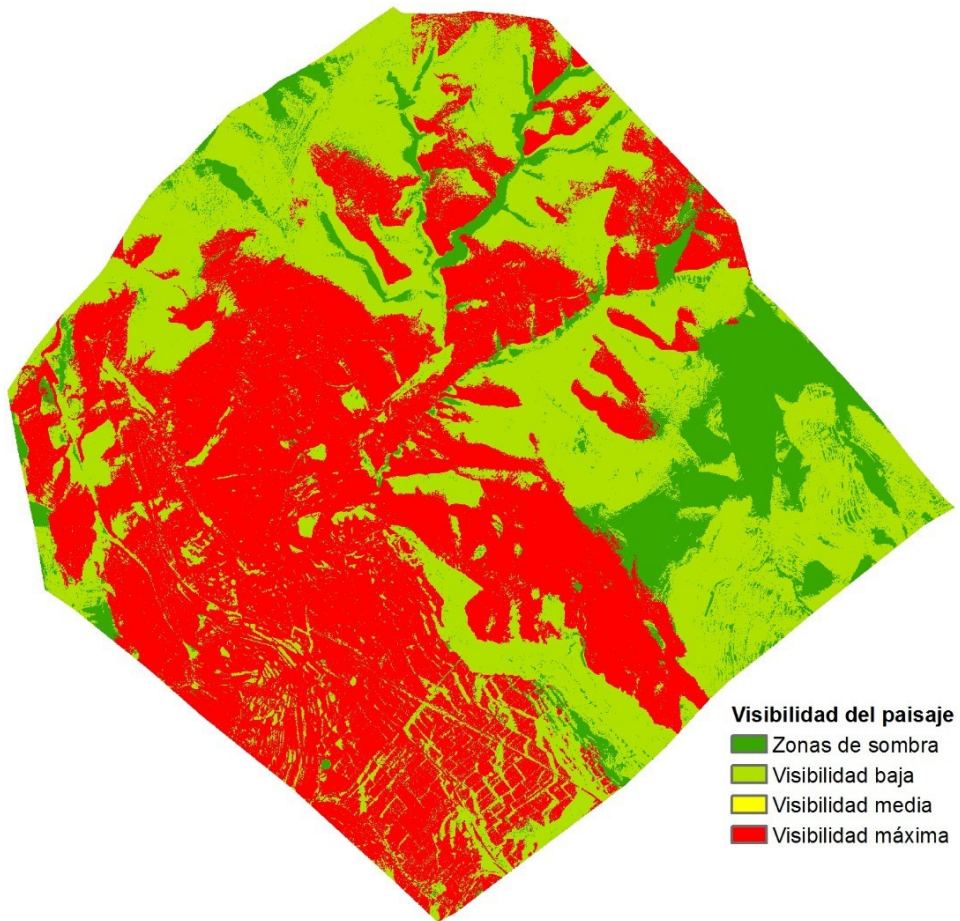
El tiempo de generación de la cuenca visual además del programa utilizado depende también del tamaño y resolución del modelo digital de superficie y de la distancia de la cuenca visual, cuanto mayor sean estos el tiempo será mayor.

### **6.3 Resultados obtenidos en el estudio comparativo del análisis visual realizado a partir de distintos modelos digitales**

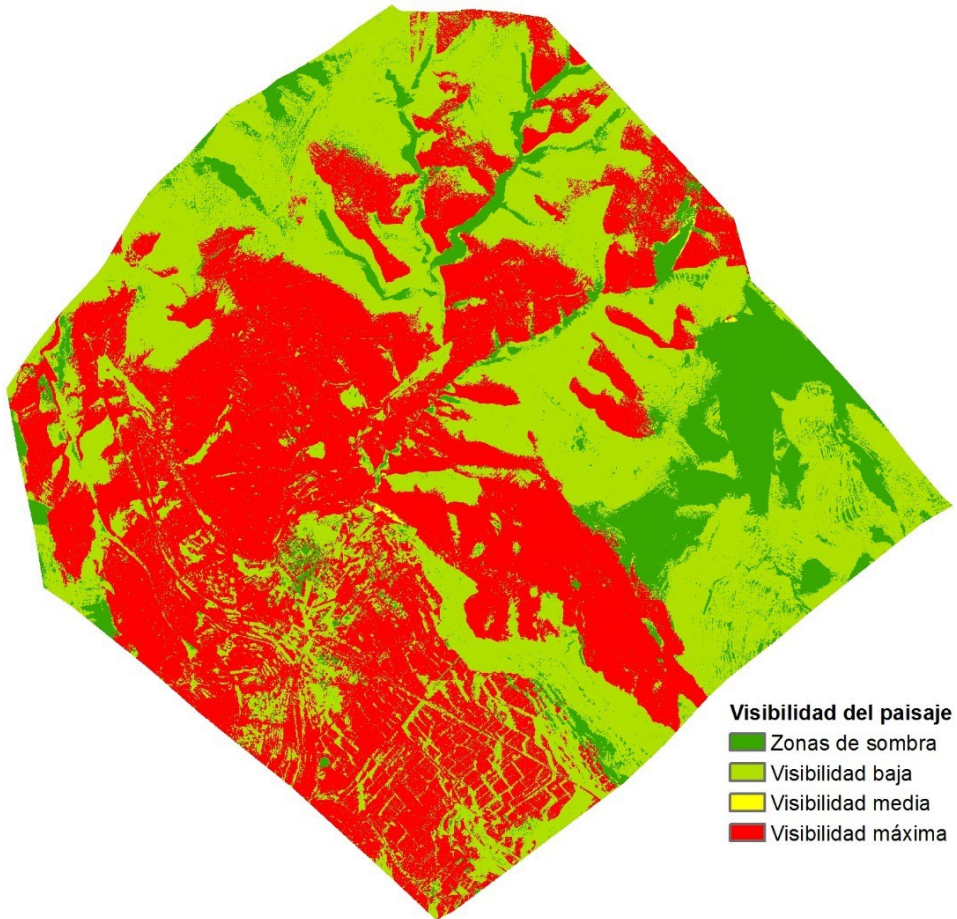
En este apartado de la investigación se ha comparado el análisis visual realizado según la normativa de la Comunitat Valenciana obtenido a partir de las cuencas visuales realizadas con un modelo digital de superficie procedente de datos LiDAR y otros dos modelos digitales de elevaciones, un modelo digital del terreno y un modelo digital del terreno más las construcciones procedentes de una capa de formato vectorial (2,5-DUSM). En las figuras siguientes puede verse el resultado del análisis visual.



**Figura 39.** Análisis visual realizado a partir del MDS



**Figura 40.** Análisis visual realizado a partir del MDT



**Figura 41.** Análisis visual realizado a partir del 2,5-DUSM'

### 6.3.1 Índice de Kappa

Para determinar el grado de similitud entre estos modelos se ha utilizado varios estadísticos de Kappa y una comparación por categorías, éstos están integrados en el programa Map Kit Comparison.



En el programa Map Kit Comparison se introducen los archivos rásters a comparar y se elige el estadístico que se va a realizar.

Los resultados obtenidos de la comparación entre el modelo digital de superficie y el modelo digital del terreno MDS-MDT son los siguientes:

**Tabla 16.** Coeficientes globales de los estadísticos de Kappa para la comparación MDS-MDT

<b>Kappa</b>	<b>K<sub>location</sub></b>	<b>K<sub>histo</sub></b>	<b>Fraction correct</b>
0,20	0,47	0,44	0,41

**Tabla 17.** Coeficientes por categorías de los estadísticos de Kappa para la comparación MDS-MDT

<b>Índice</b>	<b>Terrenos en sombra</b>	<b>Visibilidad baja</b>	<b>Visibilidad media</b>	<b>Visibilidad alta</b>
<b>Kappa</b>	0,18	0,18	0,00	0,25
<b>K<sub>Loc</sub></b>	0,87	0,21	0,00	0,86
<b>K<sub>Histo</sub></b>	0,21	0,84	0,08	0,30

Los resultados obtenidos de la comparación entre el modelo digital de superficie y el modelo digital del terreno más las construcciones (2,5-DUSM) son la siguientes:

**Tabla 18.** Coeficientes globales de los estadísticos de Kappa para la comparación MDS - (2,5-DUSM)

<b>Kappa</b>	<b>K<sub>location</sub></b>	<b>K<sub>histo</sub></b>	<b>Fraction correct</b>
0,21	0,48	0,44	0,42

Tabla 19. Coeficientes por categorías de los estadísticos de Kappa para la comparación MDS - (2,5-DUSM)

Índice	Terrenos en sombra	Visibilidad baja	Visibilidad media	Visibilidad alta
<b>Kappa</b>	0,18	0,18	0	0,27
<b>K<sub>Loc</sub></b>	0,86	0,238	-0,00236	0,84
<b>K<sub>Histo</sub></b>	0,22	0,80	0,00032	0,332

Los resultados obtenidos del índice Kappa según la escala de Landis y Koch (1977) analizan la fuerza de concordancia entre los mapas comparados. Respecto al índice Kappa obtenido de la comparación MDS-MDT éste es leve y aceptable para el MDS- (2,5-DUSM). La clasificación de leve corresponde al segundo nivel más bajo respecto a la fuerza de concordancia y aceptable al tercer nivel en una escala de  $K_{\text{histo}}$  y  $K_{\text{loc}}$  son dos estadísticos más detallados de kappa para distinguir la precisión en cantidad y ubicación (histo y loc), estos son capaces de distinguir claramente entre el error de cuantificación y error de ubicación, respectivamente. Los resultados obtenidos nos indican una diferencia notable entre los modelos digitales analizados.

Debido a que los valores de las comparaciones del 2,5-DUSM y del MDT con el MDS son muy similares se han analizado conjuntamente. En los resultados de  $K_{\text{histo}}$  y  $K_{\text{loc}}$  de las dos comparaciones del análisis visual los valores de  $K_{\text{loc}}$  son elevados para la categoría terrenos en sombra y visibilidad alta, indicando que gran parte de las categorías se encuentran en lugares idénticos, mientras que los valores son bajos para la categoría de visibilidad baja. En cuanto a los valores de  $K_{\text{histo}}$  los valores son bajos para los terrenos en sombra, visibilidad media y

visibilidad alta, lo que nos indica que la cantidad de estas categorías en los dos mapas es muy diferente.

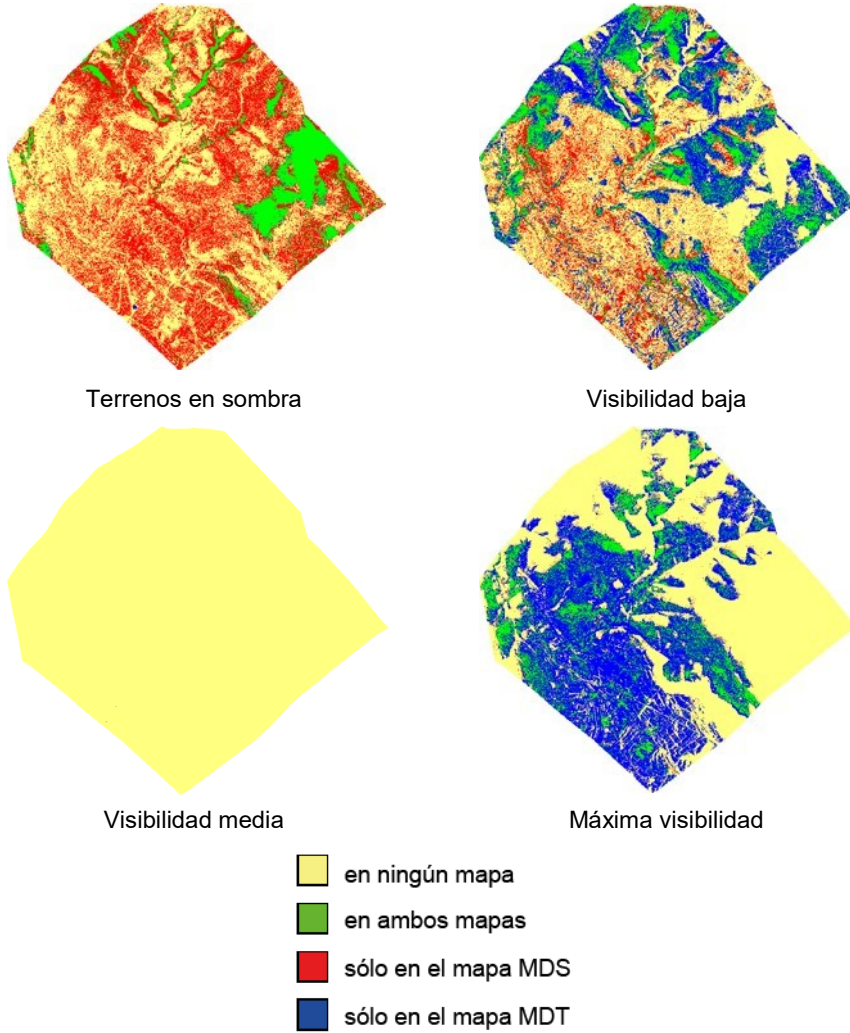
### **6.3.2 Método por categoría**

El método por categoría realiza una comparación celda por celda del modelo ráster con respecto a una categoría (seleccionada por el usuario). Este método de comparación se basa en la tabla de contingencia, que recoge la distribución cruzada de las categorías de ambos mapas. En esta investigación las categorías corresponden a las de clasificación del análisis visual (No visible, visibilidad baja, visibilidad media, máxima visibilidad).

Se han realizado dos comparaciones con este método, Análisis visual MDS vs. Análisis visual MDT y Análisis visual MDS vs. Análisis visual 2,5-DUSM, siendo el Análisis visual MDS el que es comparado con los otros dos métodos.

Aplicando este método se obtiene la aparición de la categoría seleccionada en los dos mapas analizados. En las figuras se muestra el método realizado por la comparación celda por celda de cada categoría de la clasificación del análisis visual.

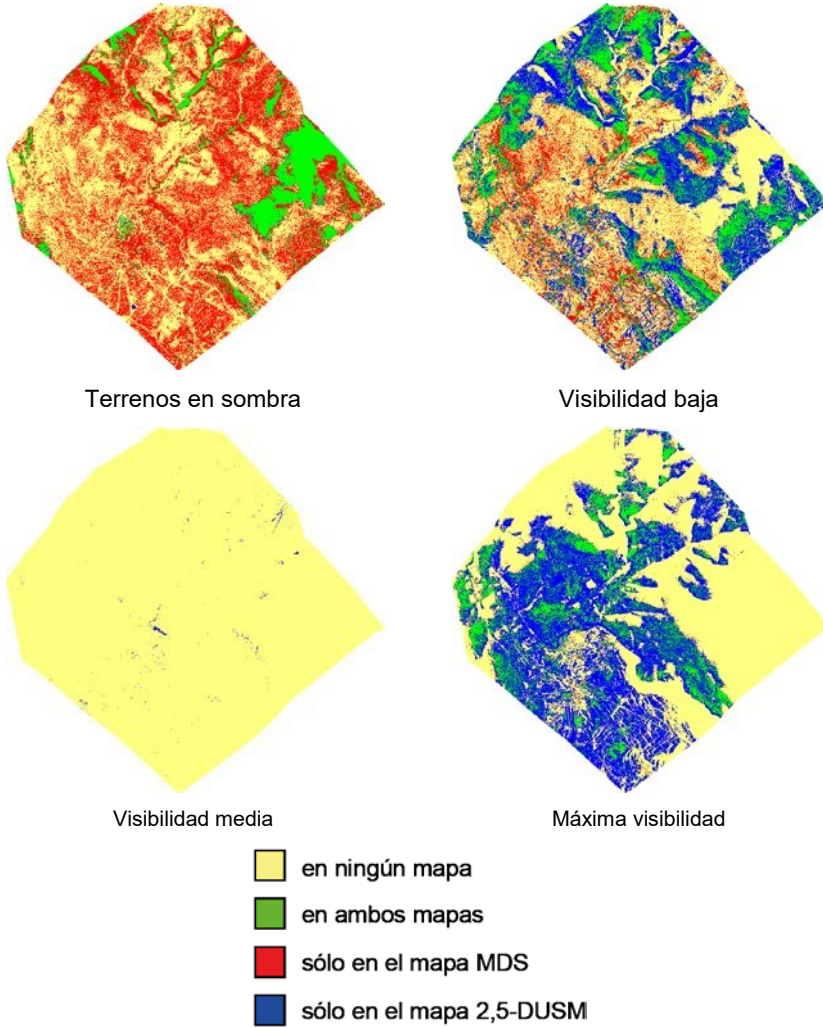
Los mapas resultantes de la comparación están representados en cuatro diferentes leyendas indicando el estado de la comparación (Figuras 42 y 43).



**Figura 42.** Comparación por categorías MDS-MDT

Tabla 20. Comparación de mapas por categoría MDS-MDT

Categorías	En ninguno de los mapas		En ambos mapas		Sólo en mapa		Solo en mapa MDT	
	n° de celdas	%	n° de celdas	%	n° de celdas	%	n° de celdas	%
<b>Terrenos en sombra</b>	3.655.474	46,33	855.037	10,84	3.325.278	42,14	55.002	0,70
<b>Zonas de visibilidad baja</b>	3.458.803	43,83	1.395.725	17,69	1.228.012	15,56	1.808.251	22,92
<b>Zonas de visibilidad media</b>	7.8907.14	100,00	0	0	3	0,00004	74	0,0009
<b>Zonas de máxima visibilidad</b>	4.034.591	51,13	1.007.238	12,76	79.498	1,01	27.694.64	35,10



**Figura 43.** Comparación por categorías MDS-(2,5-DUSM)

Tabla 21. Comparación de mapas por categoría MDS-(2,5-DUSM)

Clasificación del análisis visual	En ninguno de los mapas		En ambos mapas		Sólo en mapa MDS		Solo en mapa 2,5-DUSM	
	n° de celdas	%	n° de celdas	%	n° de celdas	%	n° de celdas	%
Terrenos en sombra	3.646.567	46,21	881.742	11,17	3.298.573	41,80	63.909	0,81
Zonas de visibilidad baja	3.351.403	42,47	1.468.328	18,61	1.155.409	14,64	1.915.651	24,28
Zonas de visibilidad media	7.972.171	100,00	0,00	0	3	0,00004	18.617	0,24
Zonas de máxima visibilidad	4.251.599	53,88	990.088	12,55	96.648	1,22	2.552.456	32,35

Únicamente se ha analizado los resultados obtenidos de la comparación del análisis visual MDS-MDT, debido a que los datos obtenidos de la comparación del análisis visual MDS-(2,5-DUSM) son muy similares y siguen el mismo comportamiento, esto se debe a que la influencia de las construcciones en la visibilidad es muy baja, debido a que las construcciones en la totalidad del municipio únicamente representan el 1,92 % de la superficie total del municipio.

Según los porcentajes de celdas obtenidos para la comparación del análisis visual MDS-MDT se observa un 42,14 % de la superficie terreno en sombra existe únicamente en el mapa del análisis visual del MDS y un total de terreno en sombra del 52,98 % (10,84 %+42,14 %), mientras que para el mapa del análisis visual del MDT, la categoría de terreno en sombra existe únicamente un 0,70 % en este mapa y en total de un 11,54 %. La diferencia total de terreno en sombra de los dos análisis

visuales es de un 41,44 %, siendo el porcentaje en sombra que existe de más en el análisis visual del MDS.

Para la categoría de zona de visibilidad baja el 17,69 % se encuentra en ambos análisis visuales, sólo en el mapa del análisis visual del MDS se obtiene el 15,56 % y sólo en el mapa del análisis visual del MDT se obtiene 22,92 %. El total de esta categoría para cada mapa sería de 33,25 % para el análisis visual del MDS y 40,61 % para el mapa del análisis visual del MDT.

Los porcentajes obtenidos en la zona de visibilidad media son muy bajos no llegando al 1 %, debido a que al clasificar la visibilidad se han obtenido pocos valores de esta clase en los dos análisis visuales.

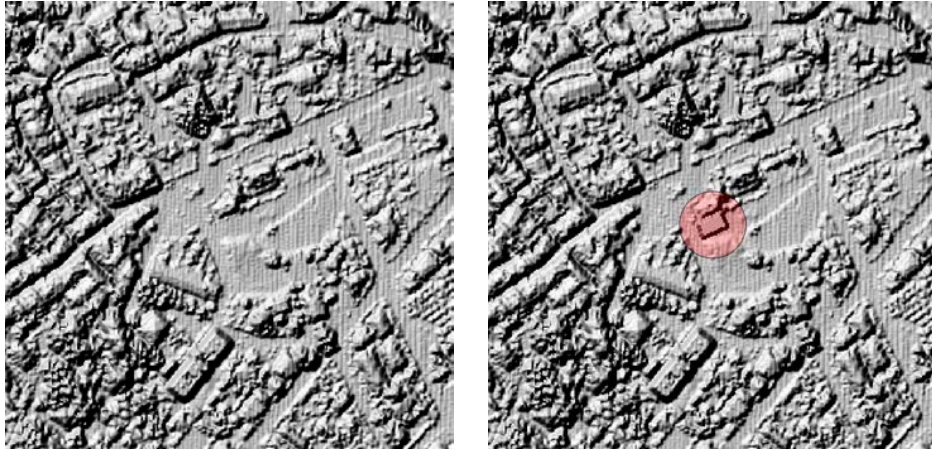
Respecto a las zonas de máxima visibilidad sólo el 12,76 % de esta categoría se encuentra en ambos mapas, un 1,01 % en el mapa MDS y un 35,10 % sólo en el mapa MDT. Siendo en total 13,77 % la zona de máxima visibilidad en el mapa MDS y 47,86 % en el mapa MDT, calculando la diferencia entre ellos se obtiene que la zona de máxima visibilidad para el mapa MDT es un 34,09 % más visible respecto al mapa MDS.



#### **6.4 Resultados del análisis visual de estudios de integración paisajística a partir de un modelo digital de superficie obtenido de datos LiDAR**

Entre los diferentes tipos de análisis visuales se ha elegido la cuenca visual de identificación debido a que en la realización del análisis visual es más precisa que la cuenca visual inversa (la más utilizada en este tipo de estudios). En la cuenca visual de identificación se utiliza la geometría y dimensiones de la actuación que se va a proyectar y a visualizar, mientras que en la cuenca visual inversa únicamente se utiliza la ubicación puntual y la altura de la actuación, no contemplándose la geometría ni las dimensiones de ésta.

El nuevo edificio propuesto para realizar su análisis visual a partir de la cuenca visual de identificación en el municipio puede verse en las Figuras 44 y 45, donde se muestra su ubicación antes y después de añadirlo al modelo digital de superficie, se ha realizado un sombreado para realzar su visualización utilizando el modelo digital de superficie (Devereux, Amable y Crow, 2008; Zakšek, Oštir y Kokalj, 2011).



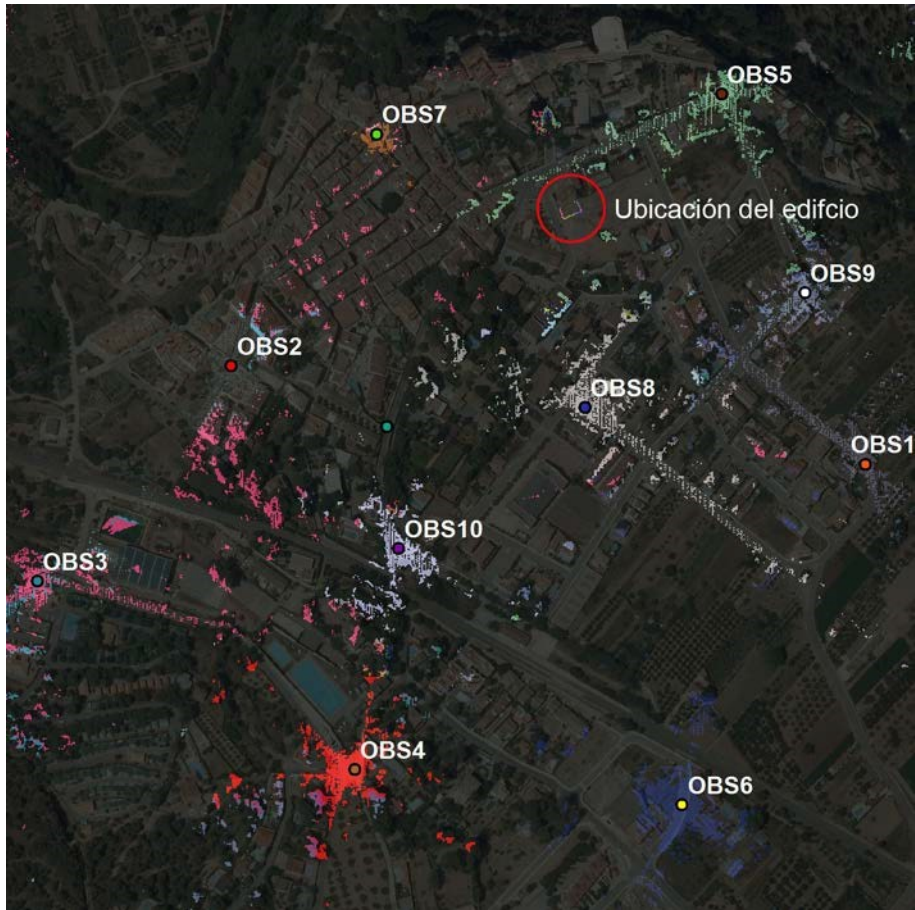
**Figura 44.** Localización del edificio en el modelo digital de superficie.



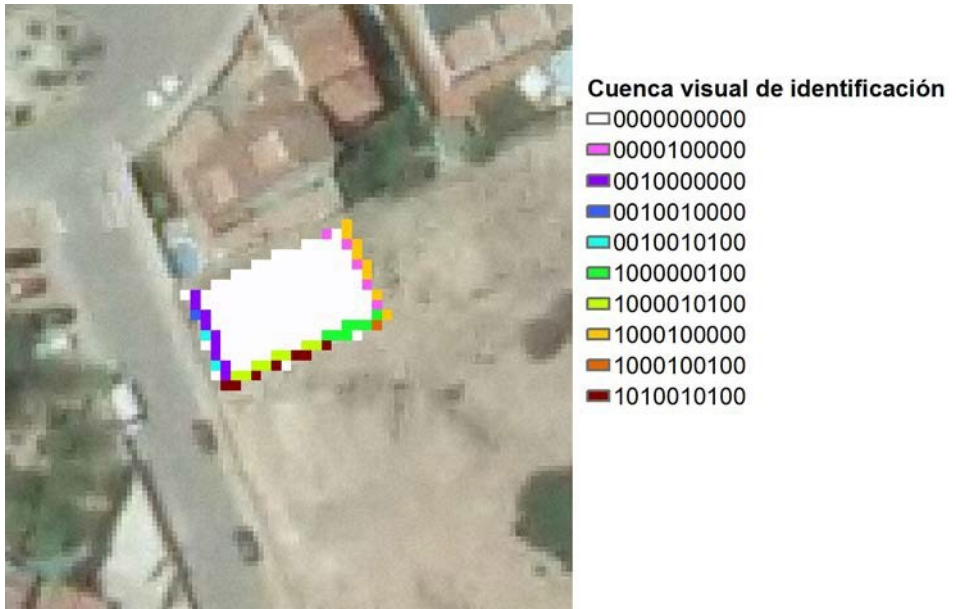
**Figura 45.** Localización del edificio en el 2,5-DUSM.

Tras utilizar la herramienta “*Observer Points*” de ArcGIS con los puntos de observación seleccionados se obtiene una cuenca visual de identificación para cada modelo digital, estas cuencas se han recortado respecto a los límites del edificio propuesto para obtener únicamente las

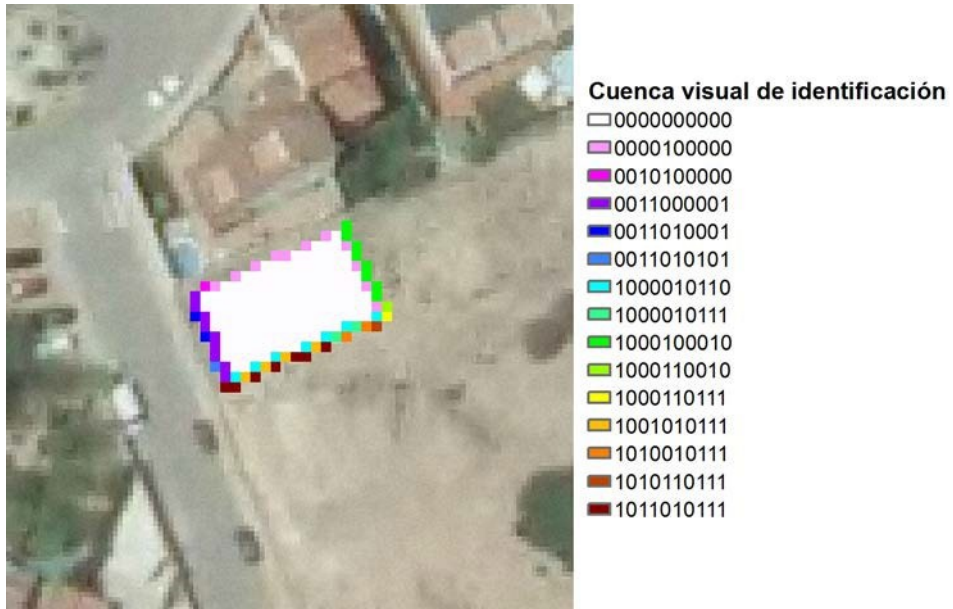
celdas pertenecientes al edificio (Figuras 46, 47 y 48). La clasificación de la cuenca visual de identificación se ha realizado con el valor de los 10 puntos de observación, siendo visible valor 1 y no visible valor 0, con lo que se muestran 10 valores pertenecientes a cada punto de observación, los cuales van del punto de observación 1 al punto de observación 10. De esta forma se puede identificar que celdas son visibles por cada punto de observación.



**Figura 46.** Cuenca visual de identificación a partir del modelo digital de superficie



**Figura 47.** Cuenca visual de identificación a partir del modelo digital de superficie respecto del edificio



**Figura 48.** Cuenca visual de identificación a partir del modelo digital de superficie urbana (2,5-DUSM)

En las tablas de atributos de los archivos ráster recortados de la cuenca visual de identificación del edificio se recoge únicamente las celdas visibles de la actuación de cada punto de observación (OBS). El sumatorio con valor 1 o mayor indica que la actuación será visible por ese observador en concreto, mientras que si el valor del sumatorio es 0 no será vista.

**Tabla 22.** Tabla de atributos de la cuenca visual de identificación a partir del modelo digital de superficie

Nª de celdas	OBS1	OBS2	OBS3	OBS4	OBS5	OBS6	OBS7	OBS8	OBS9	OBS10
144	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
8	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0
1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0
7	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0
1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0
8	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0
2	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0
7	1	0	1	0	0	1	0	1	0	0
<b>Suma</b>	<b>5</b>	<b>0</b>	<b>4</b>	<b>0</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>0</b>	<b>5</b>	<b>0</b>	<b>0</b>

**Tabla 23.** Tabla de atributos de la cuenca visual de identificación a partir del modelo digital de superficie urbana (2,5-DUSM)

Nª de celdas	OBS1	OBS2	OBS3	OBS4	OBS5	OBS6	OBS7	OBS8	OBS9	OBS10
133	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0
8	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0
1	1	0	0	0	1	1	0	0	1	0
7	1	0	0	0	0	1	0	1	1	0
9	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1
2	0	0	1	1	0	1	0	0	0	1
1	0	0	1	1	0	1	0	1	0	1
2	1	0	0	0	0	1	0	1	1	1
2	1	0	1	0	0	1	0	1	1	1
4	1	0	0	1	0	1	0	1	1	1
7	1	0	1	1	0	1	0	1	1	1
1	1	0	0	0	1	1	0	1	1	1
1	1	0	1	0	1	1	0	1	1	1
<b>Suma</b>	<b>9</b>	<b>0</b>	<b>7</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>10</b>	<b>0</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>9</b>

Al sumar los valores de cada punto de observación (OBS) se obtienen los puntos de observación en los que el edificio es visible o no visible. Cuando existe algún valor distinto de 0 el edificio es visible para ese punto de observación y cuando el valor es 0 no es visible.

En el análisis visual realizado a partir del modelo digital de superficie el edificio es visto desde cinco puntos de observación (OBS1, OBS3, OBS5, OBS6 y OBS8), siendo el 50 % del total. Mientras que en el análisis visual realizado a partir del modelo digital de superficie urbana el edificio es visto por 8 de los 10 puntos de observación (80 %), todos los puntos de observación, excepto el OBS2 y OBS7. En el análisis visual realizado a partir de un MDS el edificio es visible por 3 puntos de observación menos que en modelo digital de superficie urbana (OBS4, OBS9 y OBS10), de lo anterior se demuestra que en el análisis visual realizado a partir del modelo digital de superficie urbana (2,5 – DUSM) se obtiene mayor visibilidad, debido a que este modelo solo representa las edificaciones con una altura estimada, sin la vegetación y sin otros elementos presentes en el medio físico. En cambio esos elementos presentes en el modelo digital de superficie impiden la visibilidad en la línea de visión del observador y hacen que la visibilidad sea menor. También hay que destacar que las alturas de las edificaciones obtenidas a partir de los datos del catastro son estimadas considerando 3 m por planta de la edificación, con lo que las edificaciones pueden ser más altas o más bajas de lo que en la realidad son.



## **7. CONCLUSIONES**



## 7. CONCLUSIONES

Con los resultados obtenidos en esta investigación el técnico competente en paisaje podrá realizar un análisis visual con una metodología más precisa a partir de datos LiDAR con el programa de sistemas de información geográfica adecuado. En la realización del marco teórico se ha detectado que el análisis visual a partir de datos LiDAR en diversas aplicaciones está siendo creciente en los últimos años debido a la disponibilidad de estos datos.

Los modelos digitales de superficie realizados son más precisos cuanto mayor resolución tienen, a menor resolución los modelos digitales de superficie se asemejan a los modelos digitales del terreno debido al suavizado que se produce. La precisión del MDS también depende del método de interpolación utilizado al realizar la malla. Entre los métodos de interpolación utilizados en el que más precisión se ha obtenido con diferentes tipos de tamaño de celda ha sido de "Topo a ráster".

Los resultados de esta investigación muestran que no existen grandes diferencias sobre los 5 métodos de interpolación utilizados en el programa ArcGIS para el mismo tamaño de celda de malla, exceptuando el método de punto a ráster realizado con el programa Fusion. Los errores medios y errores medios cuadráticos son menores cuanto mayor es la resolución. El método de interpolación Topo a ráster

produce los errores más bajos con todos los tamaños de celda utilizados.

En la generación de la cuenca visual con distintos programas informáticos, el resultado obtenido por estos programas es muy similar, exceptuando el programa ENVI, debido a que las correlaciones obtenidas entre los resultados son muy altas. Únicamente se diferenciarían en el tiempo de procesado, los programas comerciales son más rápidos, siendo el tiempo de procesado más importante cuando se tienen modelos digitales de superficie de gran tamaño. En las mallas ráster del cálculo de la cuenca visual no que se han encontrado diferencias considerables a partir de programas comerciales y programas de acceso libre.

En la realización del análisis visual de los estudios de integración paisajística de las Comunidades Autónomas no existe una metodología en su realización, a excepción de la comunidad autónoma de la Comunitat Valenciana. Esto deja a los paisajistas libre criterio a la hora de realizar el análisis visual, donde pueden utilizar distintos tipos de cuencas visuales, modelos digitales de elevaciones y puntos de observación distintos unos de otros en la misma comunidad autónoma. La metodología propuesta en esta investigación pretende que sea un referente en este tipo de estudios en España, ya que los datos LiDAR se encuentran disponibles para todas las autónomas de España a fecha de la realización de la tesis, excepto a la comunidad de Andalucía.

En los análisis visuales de los estudios de paisaje de la Comunitat Valenciana existen diferencias según los modelos digitales de elevaciones que se han utilizado (MDT, MDS, 2,5-DUSM), se ha obtenido una diferencia en torno al 40 % en la comparación por categorías de la de visibilidad. Los resultados demuestran que con el uso de modelos digitales de superficie de alta resolución se obtienen análisis visuales muy distintos a los que actualmente se están realizando con modelos de superficie del terreno. Con los métodos actuales se está siendo demasiado conservador respecto a las zonas visibles ya que la mayoría del medio físico analizado es visible, con la utilización de los modelos digitales de superficie en la generación del análisis visual se obtienen menos zonas visibles.

La limitación principal del uso de los datos LiDAR se debe a que al utilizar un único valor de elevación para cada ubicación en el MDS algunos objetos como árboles aislados y puentes los métodos de interpolación los modelan como montículos sólidos. Los elementos del paisaje obstruyen la visibilidad a la hora de realizar la cuenca visual, cuando en la realidad si puede verse a través de ellos. En el caso de la visibilidad a través de los árboles depende de la especie del árbol y época del año.

Otras limitaciones de estos datos pueden darse debido a la modificación del paisaje desde la obtención de los datos LiDAR, los errores en su captura y la fecha de la realización de la cuenca visual, ya que puede haberse creado nuevas edificaciones o infraestructuras, incendios forestales que hayan eliminado la masa forestal, etc., donde se obtendría un resultado del análisis visual diferente a la realidad del medio físico en ese momento.

## **8. LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN**





## **8. LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN**

Las futuras líneas de investigación, utilizando la tecnología LiDAR en el paisaje, pueden ir enfocadas hacia:

El análisis de la evolución del paisaje a partir de modelos digitales de superficie realizados con datos LiDAR tomados en distintos años.

El desarrollo de una nueva metodología de análisis visual del paisaje de entornos urbanos realizada a partir de datos de escáner láser terrestre (TLS).

El estudio de los análisis visuales de municipios con distinta topografía y usos del suelo.



## **9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**



## 9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ackermann, F. (1999). Airborne laser scanning—present status and future expectations. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 54(2-3), 64-67.
- Aguilar, F. J., Agüera, F., Aguilar, M. A., & Carvajal, F. (2005). Effects of Terrain Morphology, Sampling Density, and Interpolation Methods on Grid DEM Accuracy. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 71(7), 805-816.
- Aguilo, M., & Blanco, A. (1981). Métodos de valoración de paisaje. *Ingeniería civil y medio ambiente, CEOTMA, MOPU. Madrid.*
- Aguiló Alonso, M. (1983). Metodología para la evaluación de la fragilidad visual del paisaje. *Informes de la Construcción*, 34(349), 67-70.
- Andresen, J., & Madsen, T. (1993). Multiple Viewshed Analysis Using GIS and Its Archaeological Application: a Case Study in Northern Mull. En T. M. and I. S. Andresen, J. (Ed.), *Computing the Past. Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology.* (pp. 125-132). Aarhus: Aarhus University Press.
- Aylward, G., & Turnbull, M. (1977). Visual analysis: a computer-aided approach to determine visibility. *Computer-Aided Design*, 9(2), 103-108.
- Benedikt, M. L. (1979). To take hold of space: isovists and isovist fields. *Environment and Planning B: Planning and Design.*
- Beraldin, J. A., Blais, F., & Lohr, U. (2010). Laser scanning technology. *Airborne and terrestrial laser scanning*, 1-42.
- Bishop, I. D., & Miller, D. R. (2007). Visual assessment of off-shore wind

- turbines: The influence of distance, contrast, movement and social variables. *Renewable Energy*, 32(5), 814-831.
- Cabrera, J., Lamelas, M. T., Montealegre, A. L., & Riva, J. De. (2014). Estimación de variables dasométricas a partir de datos LiDAR PNOA en masas regulares de *Pinus halepensis* Mill. En *XVI Congreso de Tecnologías de la Información Geográfica* (pp. 123-129).
- Carneiro, C. M. (2011). Extraction of Urban Environmental Quality Indicators using LiDAR-Based Digital Surface Models, *5050*, 321.
- Cassatella, C., & Carlone, G. (2013). GIS-based Visual Analysis for Planning and Designing Historic Urban Landscapes The case of Turin. En *2013 Digital Heritage International Congress (DigitalHeritage)* (pp. 45-52).
- Chase, A., Chase, D., Awe, J., Weishampel, J., Iannone, G., Moyes, H., Fernandez, J. (2014). Ancient Maya Regional Settlement and Inter-Site Analysis: The 2013 West-Central Belize LiDAR Survey. *Remote Sensing*, 6, 8671-8695.
- Chase, A. F., Chase, D. Z., Awe, J. J., Weishampel, J. F., Iannone, G., Moyes, H., Brown, M. K. (2014). The use of LiDAR in understanding the ancient Maya landscape. *Advances in Archaeological Practices*, 2(3), 208-221.
- Cheng, C.-P., & Shih, T.-Y. (1998). The variation of Viewshed Analysis Result Caused by Different Implementations. *Lethbridge Undergraduate Research Journal*.
- Conolly, J., & Lake, M. (2006). *Geographical information systems in archaeology*. Cambridge University Press.
- Crutchley, S., & Crow, P. (2010). *The Light Fantastic: Using airborne*

- lidar in archaeological survey*. English Heritage Swindon, UK.
- Danese, M., Nolè, G., & Murgante, B. (2009). Visual Impact Assessment in urban planning. En *Geocomputation and Urban Planning* (pp. 133-146).
- Danese, M., Nolè, G., & Murgante, B. (2011). Identifying Viewshed: New Approaches to Visual Impact Assessment. *Geocomputation, Sustainability & Environment Planning*, 73-89.
- Dean, D. J. (1997). Improving the accuracy of forest viewsheds using triangulated networks and the visual permeability method. *Canadian Journal of Forest Research*, 27(7), 969-977.
- Depellegrin, D. (2016). Assessing cumulative visual impacts in coastal areas of the Baltic Sea. *Ocean & Coastal Management*, 119, 184-198.
- Desmet, P. J. J. (1997). Effects Of linterpolation Errors On The Aanalysis Of DEMs. *Earth Surface Processes And Landforms*, 22(June 1996), 563-580.
- Devereux, B. J., Amable, G. S., & Crow, P. (2008). Visualisation of LiDAR terrain models for archaeological feature detection. *Antiquity*, 82(316), 470-479.
- Ezquerria, A., & Navarra, M. (2015). Metodología de valoración de paisaje empleando ArcGIS: Aplicación a las Vías Pecuarias. *Informes de la Construcción*, 67(537).
- Falconer, L., Hunter, D. C., Telfer, T. C., & Ross, L. G. (2013). Visual, seascape and landscape analysis to support coastal aquaculture site selection. *Land Use Policy*, 34, 1-10.
- Felicísimo, A. M. (1999). La utilización de los Modelos Digitales del Terreno en el estudio del medio físico. *Los Sistemas de*

- Información Geográfica en los riesgos naturales y en el medio ambiente. Instituto Tecnológico Geominero de España. Madrid, 127-139.*
- Ferreiro, E. G., Barreiro, L., & Miranda, D. (2013). Clasificación digital de zonas forestales usando datos LiDAR , ortofoto y análisis orientado a objetos. *Ambienta*, 66-75.
- Fines, K. D. (1968). Landscape evaluation: a research project in East Sussex. *Regional Studies*, 2(1), 41-55.
- Fisher-Gewirtzman, D., & Wagner, I. A. (2003). Spatial openness as a practical metric for evaluating built-up environments. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 30(1), 37-49.
- Fisher, P. F. (1991). First experiments in viewshed uncertainty: The accuracy of the viewshed area. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 57(10), 1321-1327.
- Fisher, P. F. (1992). First Experiments in Viewshed Uncertainty: Simulating Fuzzy Viewsheds. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 58(3), 345-352.
- Fisher, P. F. (1993). Algorithm and implementation uncertainty in viewshed analysis. *International Journal of Geographical Information Science*, 7(4), 331-347.
- Fisher, P. F. (1994). Probable and fuzzy models of the viewshed operation. *Innovations in GIS*, 1, 161-175.
- Fisher, P. F. (1996). Extending the Applicability of Viewsheds in Landscape Planning. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 62(11), 1297-1302.
- Fisher, P. F., & Tate, N. J. (2006). Causes and consequences of error in digital elevation models. *Progress in Physical Geography*, 30(4),



- 467-489.
- Floriani, L. De, Marzano, P., & Puppo, E. (1994). Line-of-sight communication on terrain models. *International Journal of Geographical Information Systems*, 8(4), 329-342.
- Fontani, F. (2016). Application of the Fisher's «Horizon Viewshed» to a proposed power transmission line in Nozzano (Italy). *Transactions in GIS*, 1-9.
- Franklin, W., & Ray, C. (1994). Higher isn't necessarily better: Visibility algorithms and experiments. *Advances in GIS research: sixth international symposium on spatial data handling*, 2, 1-22.
- Fraser, D. (1983). *Land and society in Neolithic Orkney* (Vol. 1). Oxford: British Archaeological reports.
- Gál, T., Lindberg, F., & Unger, J. (2009). Computing continuous sky view factors using 3D urban raster and vector databases: Comparison and application to urban climate. *Theoretical and Applied Climatology*, 95(1-2), 111-123.
- Galán Vivas, J. J. (2011). *Valoración y gestión del paisaje según el Convenio europeo del paisaje y el reglamento del paisaje de la Comunidad valenciana: aplicación mediante un estudio de paisaje a un espacio abierto en la Comunidad valenciana*. Universitat Politècnica de València.
- Galiana, F., & Vallés, M. (2007). La planificación del paisaje en la Comunidad Valenciana: análisis de la calidad y fragilidad visual. *Saitabi*, 57, 111-125.
- García, J. M. C., Fonte, J., Blanco, A. M., González, D., Álvarez, M. G. M., Blanco-Rotea, R., & Martínez, V. Á. (2016). Roman military settlements in the Northwest of the Iberian Peninsula: the

- contribution of historical and modern aerial photography, satellite imagery and airborne LiDAR. *AARGnews. The Newsletter of the Aerial Archaeology Research Group*, (52), 43-51.
- Garnero, G., & Fabrizio, E. (2015). Visibility analysis in urban spaces : a raster-based approach and case studies. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 42, 688-707.
- Gonçalves, G. (2002). Analysis of interpolation errors in urban digital surface models created from Lidar data. *Assessment*, 160-168.
- González-Ferreiro, E., Diéguez-Aranda, U., Crecente-Campo, F., Barreiro-Fernández, L., Miranda, D., & Castedo-Dorado, F. (2014). Modelling canopy fuel variables for *Pinus radiata* D. Don in NW Spain with low-density LiDAR data. *International Journal of Wildland Fire*, 23(3), 350-362.
- Grêt-Regamey, A., Bishop, I. D., & Bebi, P. (2007). Predicting the scenic beauty value of mapped landscape changes in a mountainous region through the use of GIS. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 34(1), 50-67.
- Grimmond, S. (2007). Urbanization and global environmental change: local effects of urban warming. *Geographical Journal*, 173(1), 83-88.
- Hamilton, S. E., & Morgan, A. (2010). Integrating lidar, GIS and hedonic price modeling to measure amenity values in urban beach residential property markets. *Computers, Environment and Urban Systems*, 34(2), 133-141.
- Haverkort, H., Toma, L., & Zhuang, Y. (2009). Computing visibility on terrains in external memory. *Journal of Experimental Algorithmics*, 13(1), 1.5.

- Hindsley, P., Hamilton, S. E., & Morgan, O. A. (2013). Gulf Views: Toward a Better Understanding of Viewshed Scope in Hedonic Property Models. *Journal of Real Estate Finance and Economics*, 47(3), 489-505.
- Hyypä, J., & Inkinen, M. (1999). Detecting and estimating attributes for single trees using laser scanner. *The photogrammetric journal of Finland*, 16(2), 27-42.
- Iverson, W. D. (1985). And that's about the size of it: visual magnitude as a measurement of the physical landscape. *Landscape journal*, 4(1), 14-22.
- Junker, S. (2014). *Durchführung und Vergleich von Sichtbarkeitsanalysen für die Vorrang-gebiete des Teilregionalplan Energie Mittelhessen mit zwei verschiedenen Geographischen Informationssystemen. Nürtingen-Geislingen*. University, School of Landscape Architecture.
- Khawaja, K. (2002). r.los - Line-of-sight raster analysis program. Recuperado 18 de enero de 2016, a partir de <https://grass.osgeo.org/grass54/manuals/r.los.html>
- Kidner, D., Sparkes, A., & Dorey, M. (1999). GIS and wind farm planning. En *Geographical Information and Planning* (pp. 203-223). Springer.
- Klein, K. R., & Cova, T. J. (2014). *Tracking a wildfire in areas of high relief using volunteered geographic information: A viewshed application*.
- Klouček, T., Lagner, O., & Šímová, P. (2015). How does data accuracy influence the reliability of digital viewshed models? A case study with wind turbines. *Applied Geography*, 64, 46-54.

- Lake, I. R., Lovett, A. a., Bateman, I. J., & Langford, I. H. (1998). Modelling environmental influences on property prices in an urban environment. *Computers, Environment and Urban Systems*, 22(2), 121-136.
- Lake, M. W., Woodman, P. E., & Mithen, S. J. (1998). Tailoring GIS Software for Archaeological Applications: An example concerning Viewshed Analysis. *Journal of Archaeological Science*, 25, 27-38.
- Landis, J. R., & Koch, G. G. (1977). The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics*, 33(1), 159-174.
- Lee, J. (1991). Analyses of visibility sites on topographic surface. *International Journal of Geographical Information Systems*, 5(4), 413-429.
- Lindsey, G., Wilson, J., Yang, J. A., Alexa, C., Anne Yang, J., & Alexa, C. (2008). Urban greenways, trail characteristics and trail use: Implications for design. *Journal of Urban Design*, 13(1), 53-79.
- Llobera, M. (2003a). Extending GIS-based visual analysis: the concept of visualsapes. *International Journal of Geographical Information Science*, 17-1(January 2015), 37-41.
- Llobera, M. (2003b). Extending GIS-based visual analysis: the concept of visualsapes. *International Journal of Geographical Information Science*, 17-1(January 2015), 37-41.
- Lonergan, C., Hedley, N., & Clague, J. J. (2015). A visibility-based assessment of tsunami evacuation signs in Seaside, Oregon. *Natural Hazards*, 78(1), 41-59.
- Lynch, K. (1976). *Managing the sense of a region*. Cambridge: MIT Press.
- Martínez, J., Martín, M. P., & Romero, R. (2003). Valoración del paisaje

- en la zona de especial protección de aves carrizales y sotos de Aranjuez (Comunidad de Madrid). *GeoFocus (Artículos)*, 3, 1-21.
- Martínez, J., Ojeda, J., & Villa, G. (2011). Aplicaciones del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea en el Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables. *SAUCE. Boletín de la Estrategia Nacional de Restauración de Ríos*, 3, 14-15.
- McGaughey, R. J. (2009). FUSION/LDV: Software for LIDAR data analysis and visualization. *US Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station: Seattle, WA, USA*, 123(2).
- Meek, S., Goulding, J., & Priestnall, G. (2013). The Influence of Digital Surface Model Choice on Visibility-based Mobile Geospatial Applications. *Transactions in GIS*, 17(4), 526-543.
- Mills, K., Fox, G., & Heimbach, R. (1992). Implementing an intervisibility analysis model on a parallel computing system. *Computers & Geosciences*.
- Mínguez, S. Z., & Álvarez, F. A. (2015). El concepto de paisaje y sus elementos constituyentes: requisitos para la adecuada gestión del recurso y adaptación de los instrumentos legales en España. (Spanish). *The Concept of Landscape and its Constitutive Elements: Requirements for Adequate Management of the Resource and Adaptation of Legal Tools in Spain. (English)*, 24(1), 29-42.
- Mitášová, H., & Mitáš, L. (1993). Interpolation by regularized spline with tension: I. Theory and implementation. *Mathematical Geology*, 25(6), 641-655.
- Montealegre, A. L., Lamelas, M. T., & Riva, J. De. (2014). Evaluación de métodos de interpolación utilizados en la creación de modelos

- digitales de elevaciones para la normalización de la nube de puntos LIDAR-PNOA en aplicaciones forestales. En *XVI Congreso Nacional de Tecnologías de la Información Geográfica 25, 26 y 27 de Junio de 2014. Alicante*. (pp. 116-122).
- Morán, T. (2013). Cartografía de vegetación de la Comunidad de Madrid utilizando información LiDAR. *Congreso SECF*, 1-14.
- Morello, E., & Ratti, C. (2009). A digital image of the city: 3D isovists in Lynch's urban analysis. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 36(5), 837-853.
- Murgoitio, J. J., Shrestha, R., Glenn, N. F., Spaete, L. P., Murgoitio, J. J., Shrestha, R., ... Spaete, L. P. (2013). Improved visibility calculations with tree trunk obstruction modeling from aerial LiDAR. *International Journal of Geographical Information Science*, 27(10), 1865-1883.
- Nielsen, C., & Costopoulos, A. (2005). The impact of terrain severity on variation in viewshed generation. Comparing Idrisi, ArcMap and GRASS. *Archaeological Computing Newsletter*, 62, 17-26.
- Paulson, M. J. (1978). Visual Information System for Low-cost Terrain Analysis. *Landscape Architecture*, 68, 233-235.
- Pellicer, I., E., Estornell, J., & Martí, J. (2014). Application of airborne LiDAR data in viewshed analysis [Aplicación de datos LiDAR aéreo para el cálculo de cuencas visuales]. *Revista de Teledetección*, 0(41), 9-18.
- Peucker, T. K., Fowler, R. J., Little, J. J., & Mark, D. M. (1978). The triangulated irregular network. *American Society of Photogrammetry Proceedings of Digital Terrain Models Symposium*, 96-103.

- Phelps, G. M. I. (2011). *A Light Detection and Ranging ( Lidar ) study of the Sierra Nevada with geo-spatial applications* By Submitted to the Program of Environmental Systems and School of Engineering In Partial Fulfillment of the Requirement for the Degree of University of Calif. University of California.
- Pompa-García, M., Solís-Moreno, R., Rodríguez-Téllez, E., & Pinedo-Álvarez, A. (2010). Viewshed Analysis for Improving the Effectiveness of Watchtowers , in the North of Mexico. *The open Forest Science Journal*, 17-22.
- Pompa-garcía, M., Zapata-molina, M., Hernández-díaz, C., & Rodríguez-téllez, E. (2012). Geospatial Model as Strategy to Prevent Forest Fires : A Case Study, 2012(September), 1034-1038. Popescu, S. C., Wynne, R. H., & Nelson, R. F. (2003). Estimating plot- level tree heights with lidar: Local filtering with a canopy-height based variable window size. *Computers and Electronics in Agriculture*, 37(1-3), 71-95.
- Press, A., Camp, R. J., Sinton, D. T., & Knight, R. L. (2013). Viewsheds : management complementary a. *Habitat management and conservation*, 25(3), 612-615.
- Ralling, P., Kidner, D., & Ware, A. (1999). Distributed viewshed analysis for planning applications. *Innovations in GIS*, 6, 185-199.
- Rana, S. (2002). Isovist analyst extension. *London, Centre for Advanced Spatial Analysis, University College London*.
- Red de Parques Nacionales. (2014). *Empleo de la tecnología LiDAR para el seguimiento ecológico: aplicación piloto para la Red de Parques Nacionales y comparativa con los datos LiDAR del PNOA*. Riggs, P. D., & Dean, D. J. (2007). An investigation into the causes of

- errors and inconsistencies in predicted viewsheds. *Transactions in GIS*, 11(2), 175-196.
- Rod, J. K., & van der Meer, D. (2009). Visibility and dominance analysis: assessing a high-rise building project in Trondheim. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 36(4), 698-710.
- Ruggles, C. L. N., Medyckyj-Scott, D. J., & Gruffydd, A. (1993). Multiple viewshed analysis using GIS and its archaeological application: a case study in northern Mull. En *Computing the past. Proc. of the CAA92 conference, Aarhus, Denmark* (Vol. 1992, pp. 27-29).
- Ruiz, D. D., Gracia, T. L., Gracia, A. L. M., & Fernández, J. de la R. (2016). Estimación de la pérdida de biomasa y de las emisiones de CO<sub>2</sub> generadas por la combustión de masas forestales de *Pinus halepensis* Mill. en el incendio de Luna (Aragón), mediante datos LiDAR-PNOA. En *XVII Congreso Nacional de Tecnologías de Información Geográfica* (pp. 83-88). Málaga.
- Růžicková, K., Dohnalová, M., & Růžicka, J. (2012). Sensitivity analysis of analysis of visibility from line. En *Proceedings of surface models for geosciences (GIS '12)* (pp. 225-239). Ostrava, Czech Republic.
- Santamaría-Peña, J., Sanz-Adán, F., Martínez-Rubio, A., & Valbuena-Rabadán, M. Á. (2015). Use of lidar technology for detecting energy efficient roofs in Urban Areas | Uso de tecnología lidar en la detección de tejados energéticamente eficientes en áreas urbanas. *Dyna (Spain)*, 90(6), 636-642.
- Serrano Giné, D. (2015). Valoración escénica de paisaje periurbano con utilidad en planeamiento territorial. Estudio de caso en la Región Metropolitana de Barcelona. *Investigaciones Geográficas*, 2015(88), 109-121.



- Shach-Pinsly, D., Fisher-Gewirtzman, D., & Burt, M. (2011). Visual Exposure and Visual Openness: An Integrated Approach and Comparative Evaluation. *Journal of Urban Design*, 16(2), 233-256.
- Sibson, R., & others. (1981). A brief description of natural neighbour interpolation. *Interpreting multivariate data*, 21, 21-36.
- Sithole, G., & Vosselman, G. (2004). Experimental comparison of filter algorithms for bare-Earth extraction from airborne laser scanning point clouds. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 59, 85-101.
- Smith, S. L., Holland, D. A., & Longley, P. A. (2005). Quantifying Interpolation Errors in Urban Airborne Laser Scanning Models, 37, 200-224.
- Smith, S. L., Holland, D. A., Longley, P. A., Survey, O., & Road, R. (2003). The Effect of Changing Grid Size in the Creation of Laser Scanner Digital Surface Models. *Scanning*.
- Steinitz, C. (1974). *The interaction between urbanization and land: quality and quantity in environmental planning and design: progress report for years one, two and three, proposal for year four*. (University). Cambridge, Mass.: Landscape Architecture Research Office, Graduate School of Design, Harvard University.
- Stucky, D., & Lee, J. (1998). On applying viewshed analysis for determining least-cost paths on Digital Elevation Models. *International Journal of Geographical Information Science*.
- Štular, B., Kokalj, Ž., Oštir, K., & Nuninger, L. (2012). Visualization of lidar-derived relief models for detection of archaeological features. *Journal of Archaeological Science*, 39(11), 3354-3360.
- Tandy, C. R. V. (1967). *The isovist method of landscape survey*.

- Symposium: Methods of landscape analysis*. London: Landscape Research Group.: (Ed.), A. Murray.
- Tévar, G. (1996). La cuenca visual en el análisis del paisaje. *Serie Geográfica*, 6(1), 99-113.
- Travis, M. R., Elsner, G. H., Iverson, W. D., Johnson, C. G., & others. (1975). *VIEWIT: Computation of seen areas, slope, and aspect for land-use planning*.
- Unger, J. (2009). Connection between urban heat island and sky view factor approximated by a software tool on a 3D urban database. *International Journal of Environment and Pollution*, 36(1/2/3), 59.
- Weitkamp, G. (2011). Mapping landscape openness with isovists. *Research in Urbanism Series*, 2(1), 205-223.
- Wheatley, D. (1995). Cumulative viewshed analysis: a GIS-based method for investigating intervisibility, and its archaeological application. *Archaeology and geographical information systems: a European perspective*, 171-185.
- Wheatley, D., & Gillings, M. (2000). Vision, perception and GIS: developing enriched approaches to the study of archaeological visibility. *NATO ASI SERIES A LIFE SCIENCES*, 321, 1-27.
- Wheatley, D., & Gillings, M. (2002). *Spatial technology and archaeology: the archaeological applications of GIS*. New York: Taylor and Francis.
- Wilson, J., Lindsey, G., & Liu, G. (2008). Viewshed characteristics of urban pedestrian trails, Indianapolis, Indiana, USA. *Journal of Maps*, 4(1), 108-118.
- Wilson, J. P. (2012). Digital terrain modeling. *Geomorphology*, 137(1), 107-121.

- Yang, P. P. J., Putra, S. Y., & Li, W. (2007). Viewsphere: A GIS-based 3D visibility analysis for urban design evaluation. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 34(6), 971-992.
- Yang, X., & Hodler, T. (2000). Visual and statistical comparisons of surface modeling techniques for point-based environmental data. *Cartography and Geographic Information Science*, 27(2), 165-176.
- Zakšek, K., Oštir, K., & Kokalj, Ž. (2011). Sky-view factor as a relief visualization technique. *Remote Sensing*, 3(2), 398-415.
- Zamora Merchán, M. (2006). Visibilidad y SIG en arqueología: mucho más que ceros y unos. *La aplicación de los SIG en la arqueología del paisaje*.

## **NORMATIVA**

- Diario Oficial de la Generalitat de Cantabria. 2014 Ley 4/2014, de 22 de diciembre, del Paisaje. Cantabria: Diario Oficial de Cantabria.
- Diario Oficial de la Generalitat de Cataluña. 2005. Ley 8/2005 del 8 de junio, de Protección, Gestión y Ordenación del Paisaje. Cataluña: Diario Oficial de la Generalitat de Cataluña.
- Diario Oficial de la Generalitat de Cataluña. 2006. Decreto 343 del 2006, por el que se desarrolla la Ley 8 del 8 de junio del 2005, de Protección, Gestión y Ordenación del Paisaje, y se regulan los estudios e informes de impacto e integración paisajística. Cataluña: Diario Oficial de la Generalitat de Cataluña.
- Diario Oficial de Galicia. 2008. Ley 7/2008 del 7 de julio, de Protección del Paisaje de Galicia. Galicia: Diario Oficial de Galicia.
- Diario Oficial de la Generalitat Valenciana. 2014. Ley 5/2014, de 25 de julio, de la Generalitat, de Ordenación del Territorio, Urbanismo y

Paisaje, de la Comunitat Valenciana. Valencia: Diario Oficial de la Generalitat Valenciana.

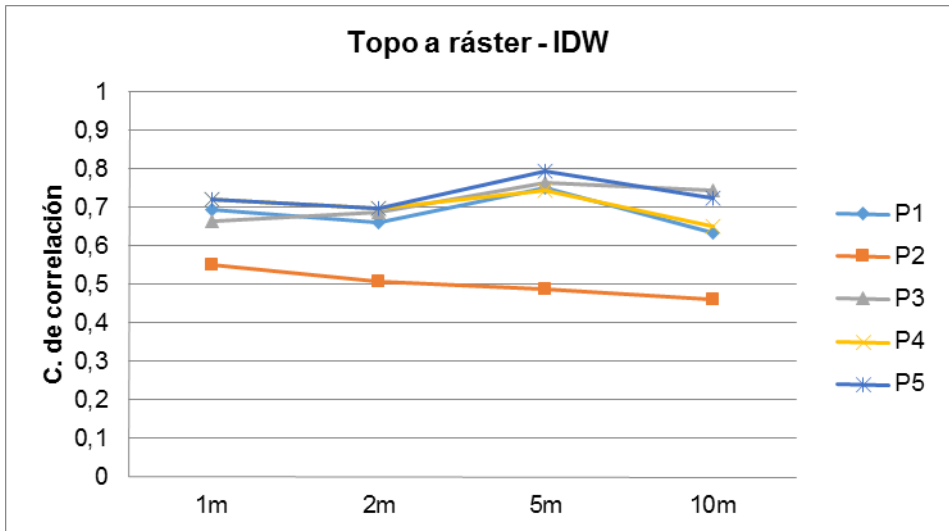
Diario Oficial de la Región de Murcia. 2015. Ley 13/2015, de 30 de marzo, de ordenación territorial y urbanística de la Región de Murcia. Valencia: Diario Oficial de la Región de Murcia.

Diario Oficial del País Vasco. 2014. Decreto 90/2014, de 3 de junio, sobre protección, gestión y ordenación del paisaje en la ordenación del territorio de la Comunidad Autónoma del País Vasco. País Vasco: Diario Oficial del País Vasco.

## **10. ANEXOS**



### 10.1 ANEXO I Correlación entre cuencas visuales de distintos modelos digitales de superficie



**Figura I. 1.** Coeficiente de correlación Topo a ráster - IDW

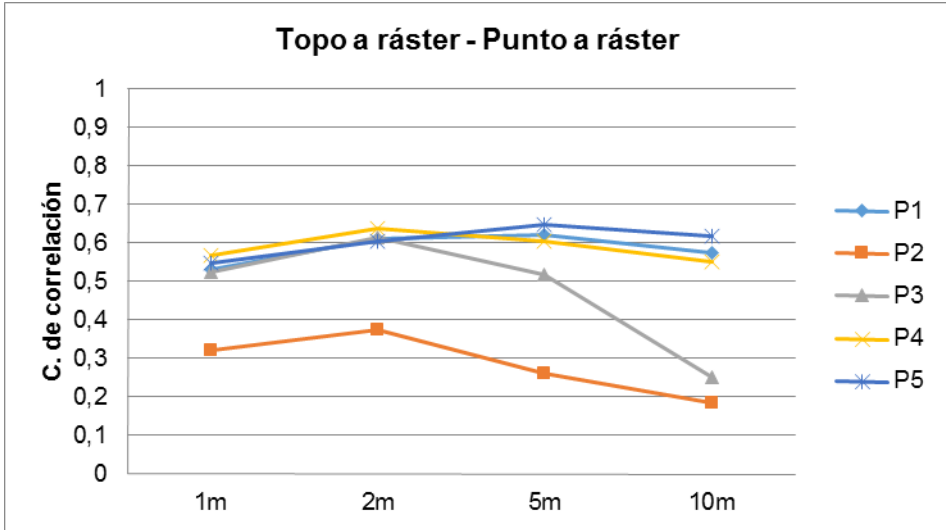


Figura I. 2. Coeficiente de correlación Topo a ráster - Punto a ráster

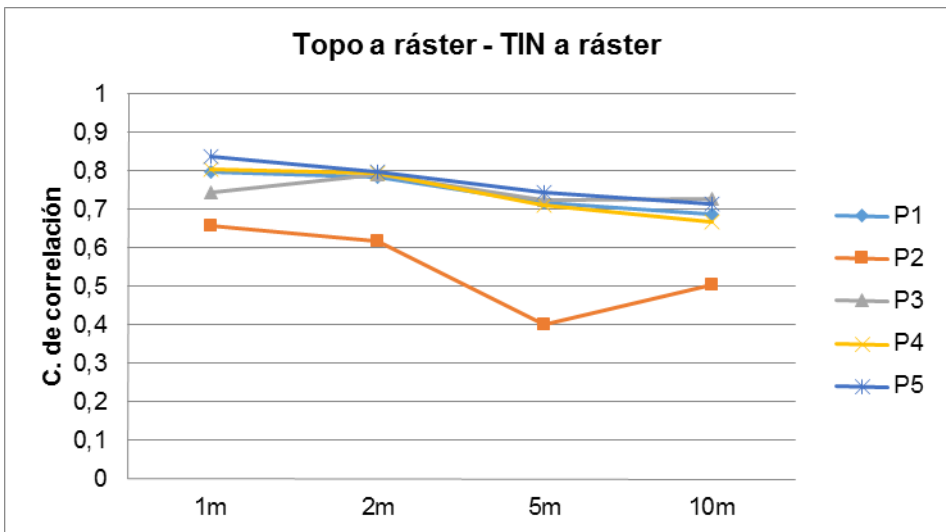
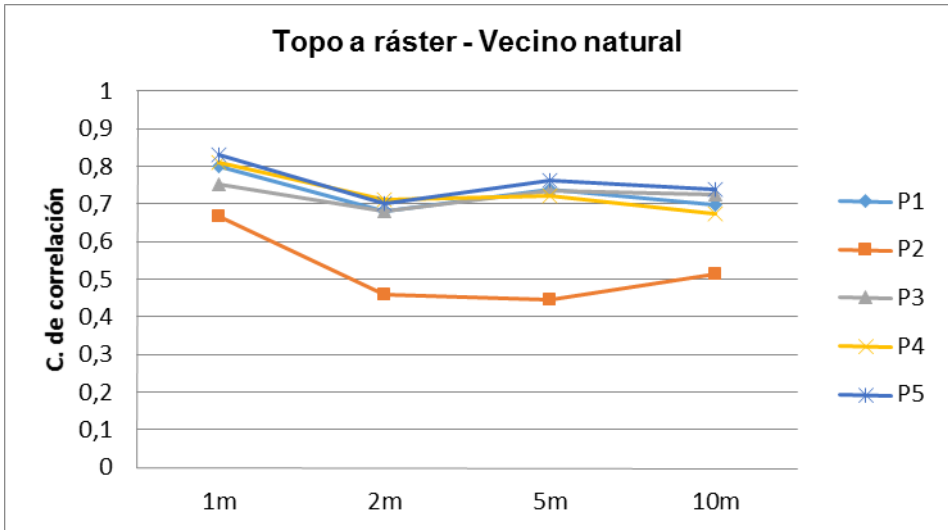
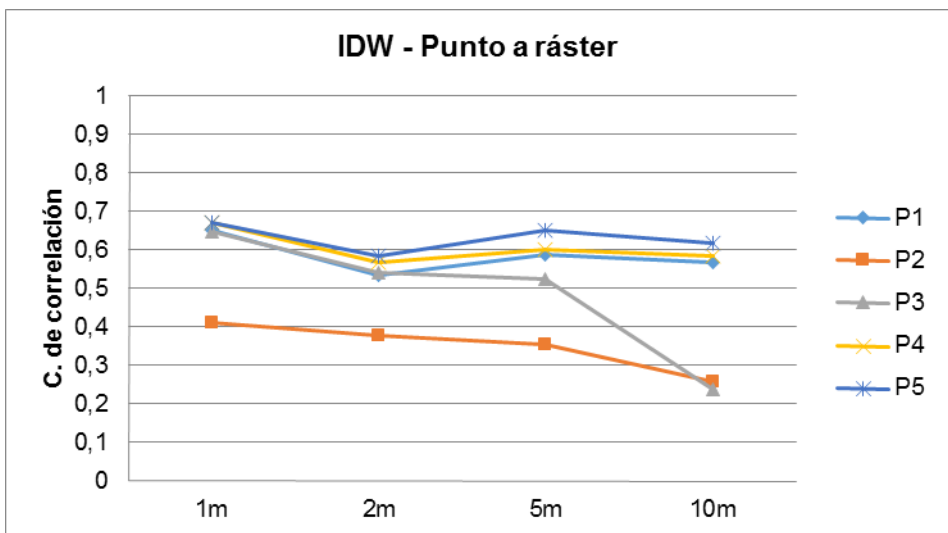


Figura I. 3. Coeficiente de correlación Topo a ráster - TIN a ráster





**Figura I. 4.** Coeficiente de correlación Topo a ráster - Vecino natural



**Figura I. 5.** Coeficiente de correlación IDW - Punto a ráster

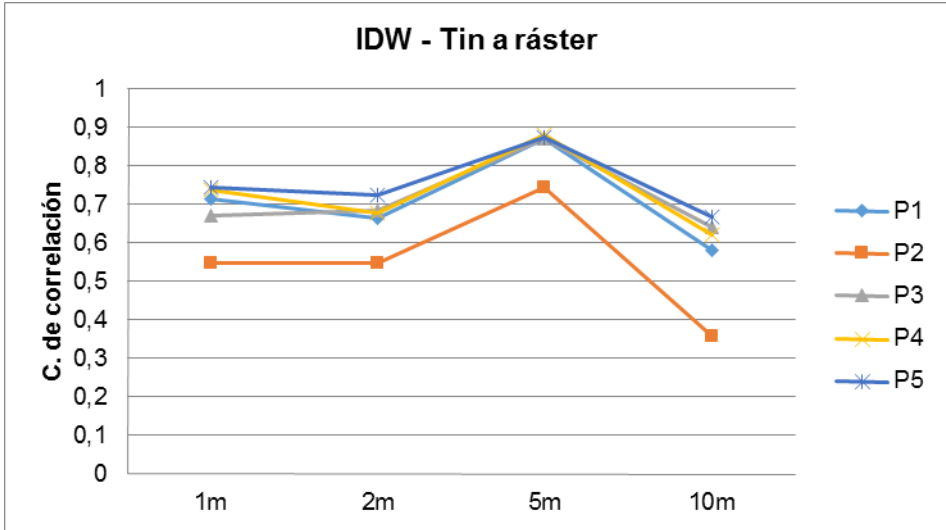


Figura I. 6. Coeficiente de correlación IDW - TIN a ráster

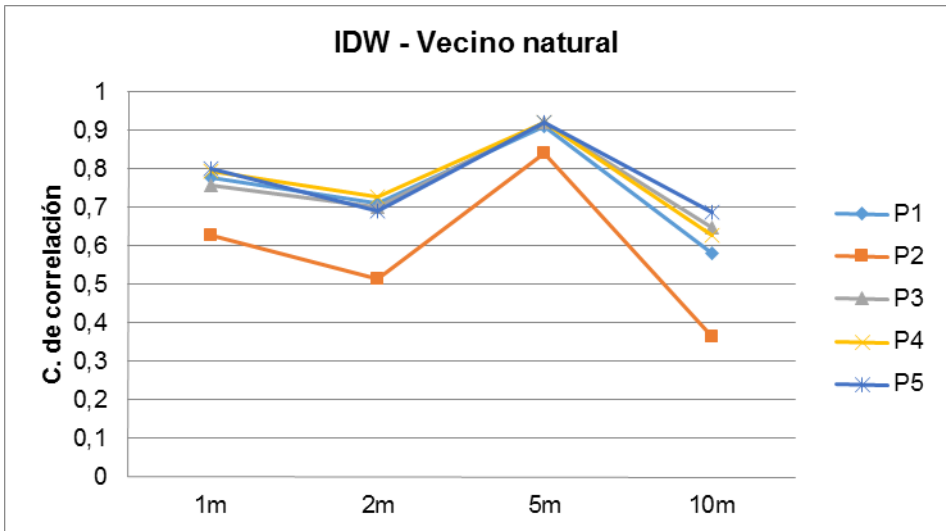
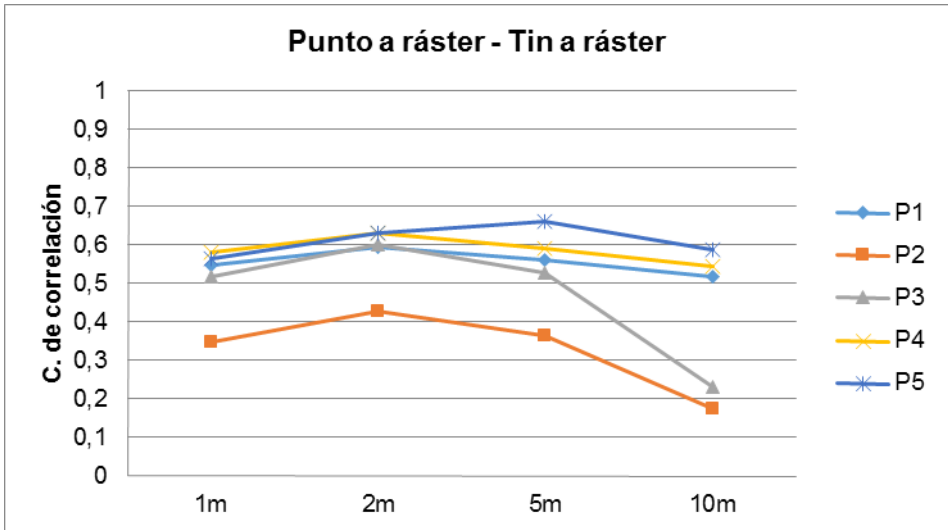
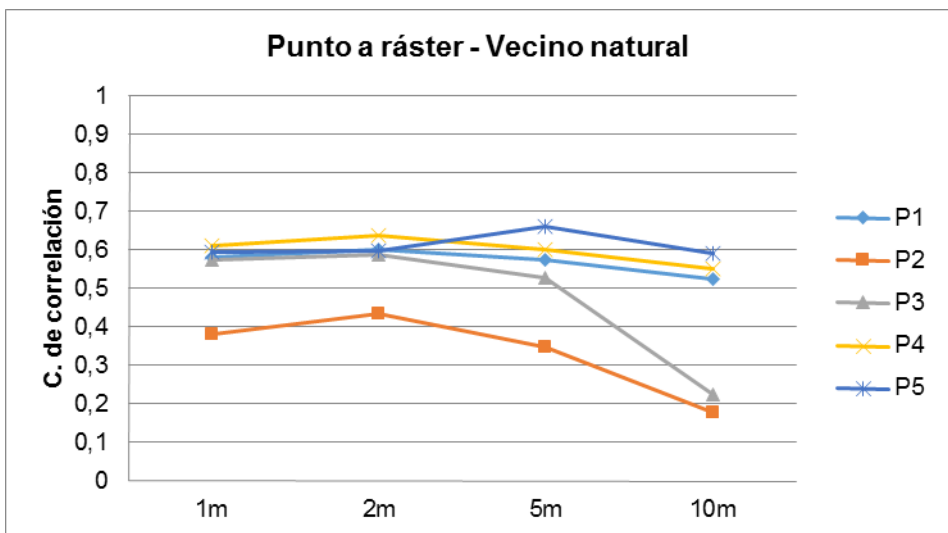


Figura I. 7. Coeficiente de correlación IDW - Vecino natural



**Figura I. 8.** Coeficiente de correlación Punto a ráster - TIN a ráster



**Figura I. 9.** Coeficiente de correlación Punto a ráster - Vecino natural

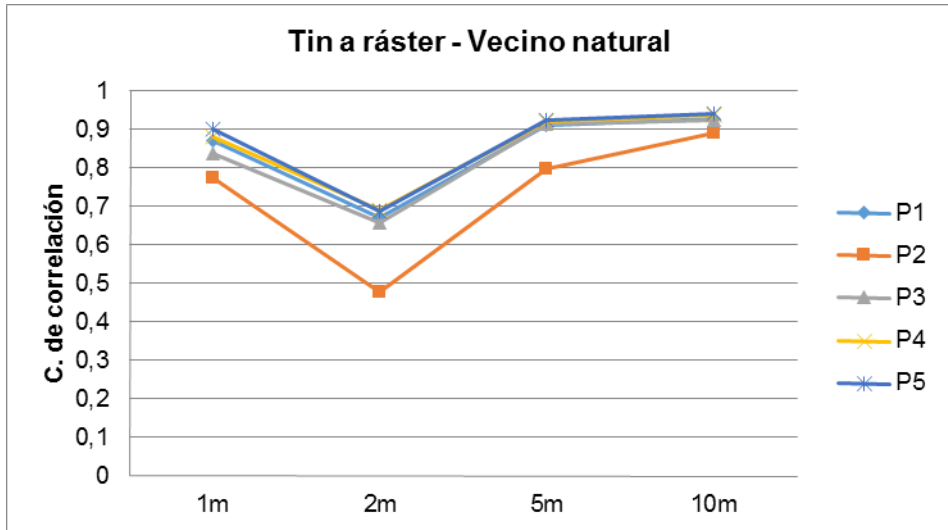
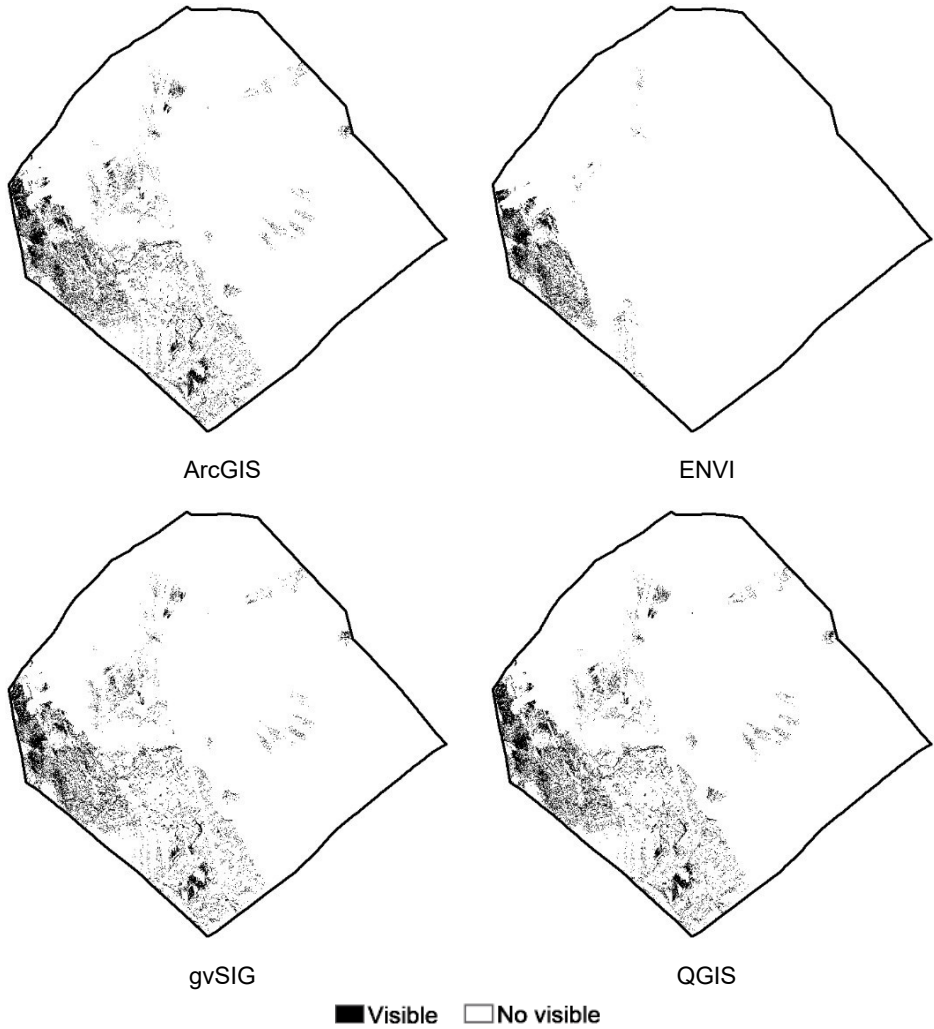
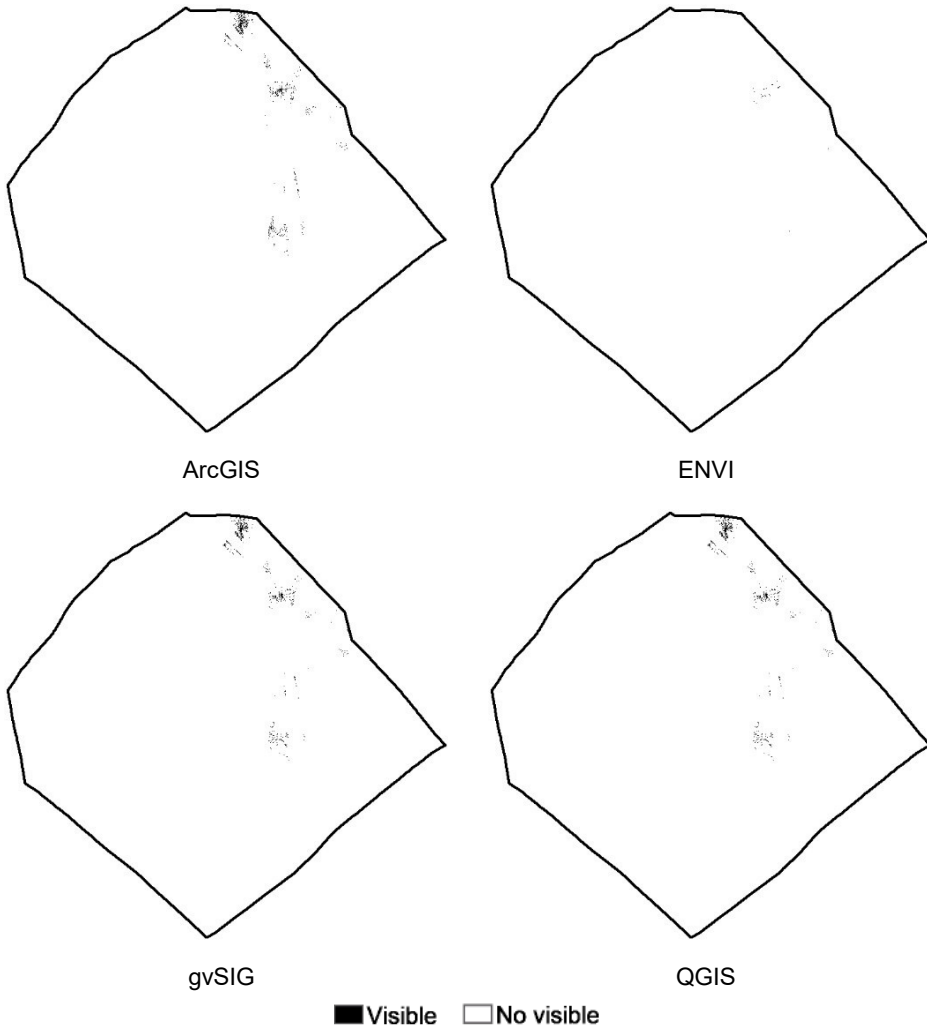


Figura I. 10. Coeficiente de correlación TIN a ráster - Vecino natural

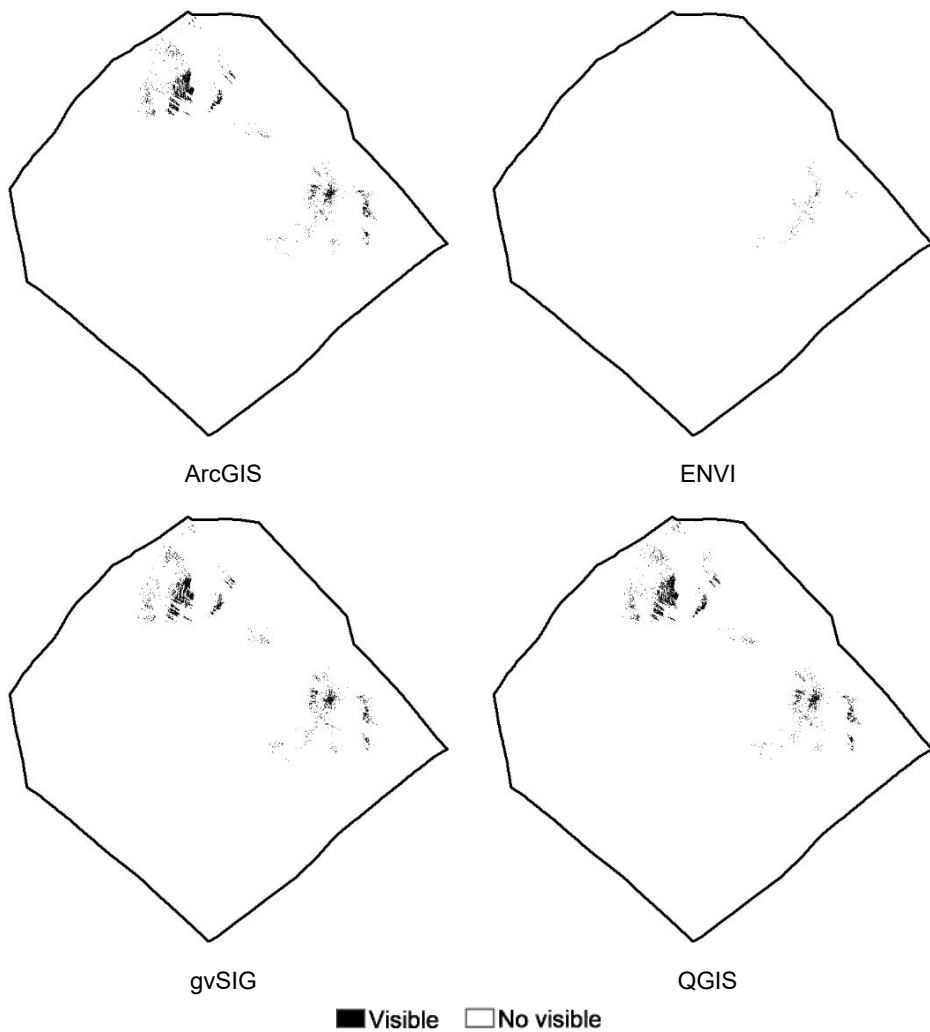
## 10.2 ANEXO II Cuencas visuales según punto de vista y programa



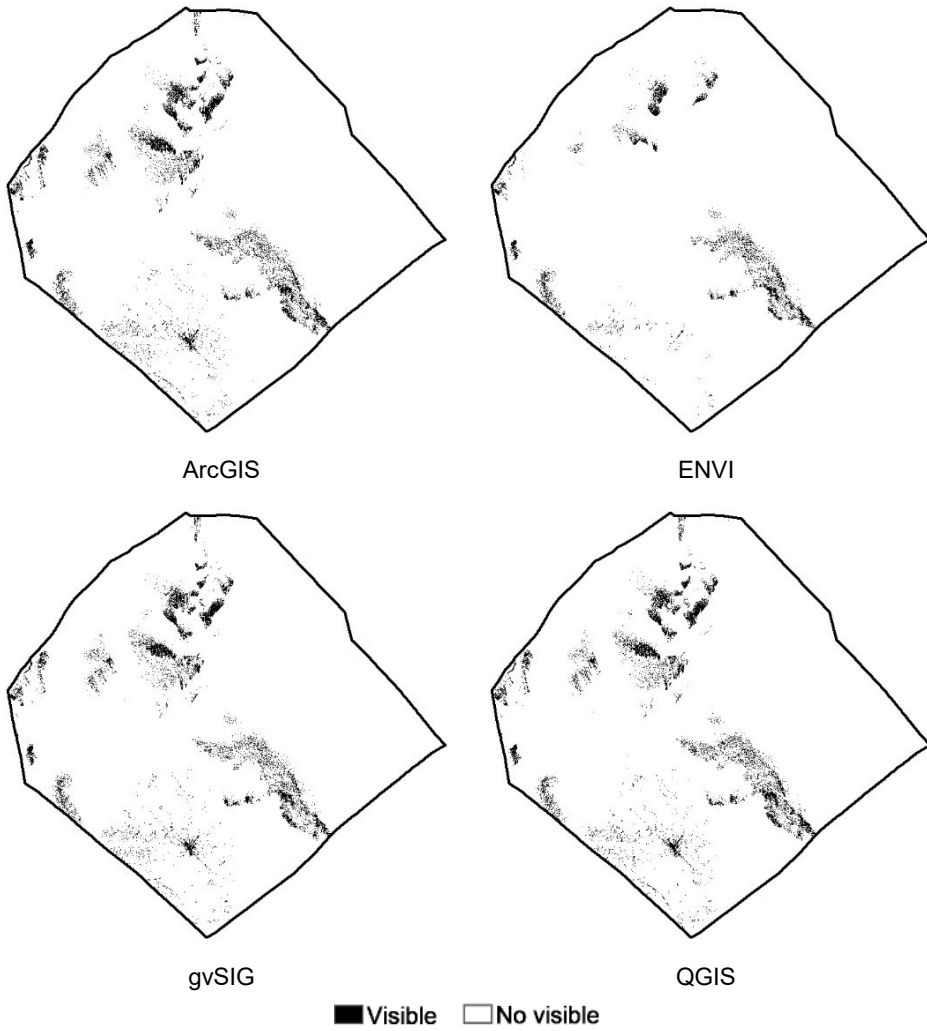
**Figura II. 1.** Cuenca visual del punto 1



**Figura II. 2.** Cuenca visual del punto 2

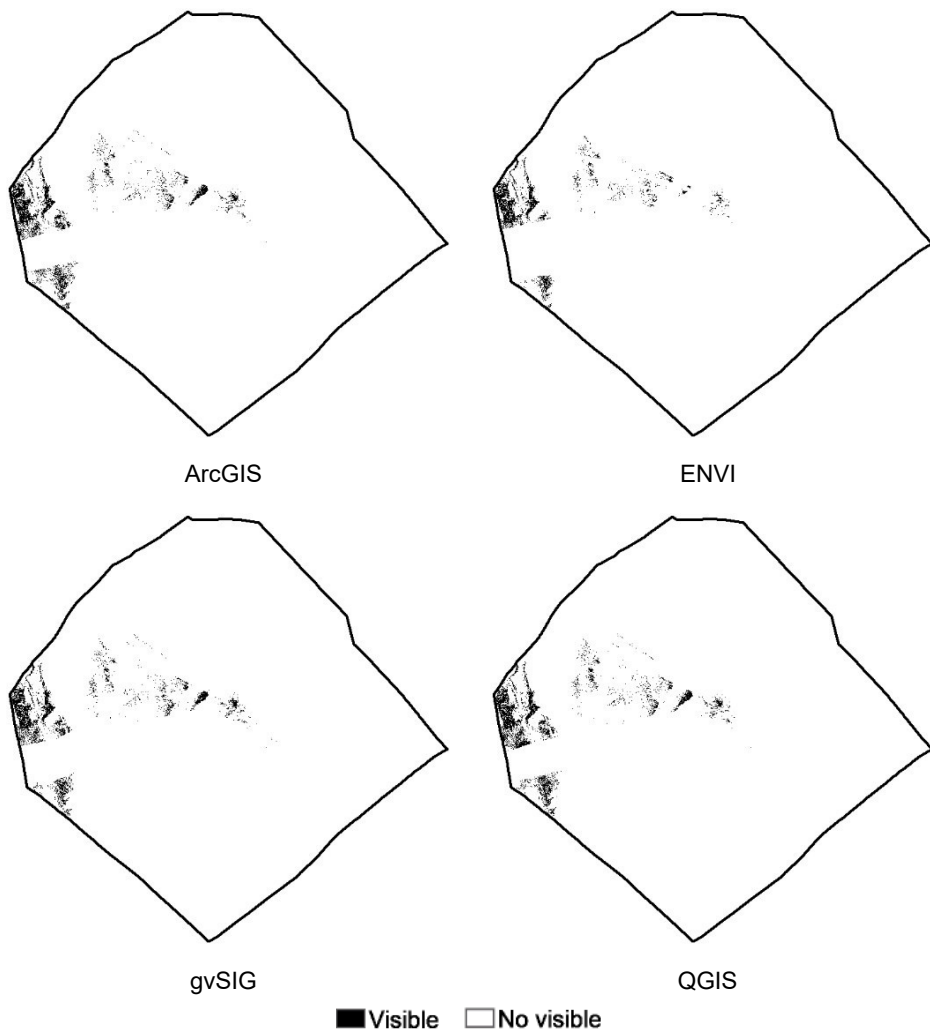


**Figura II. 3.** Cuenca visual del punto 3



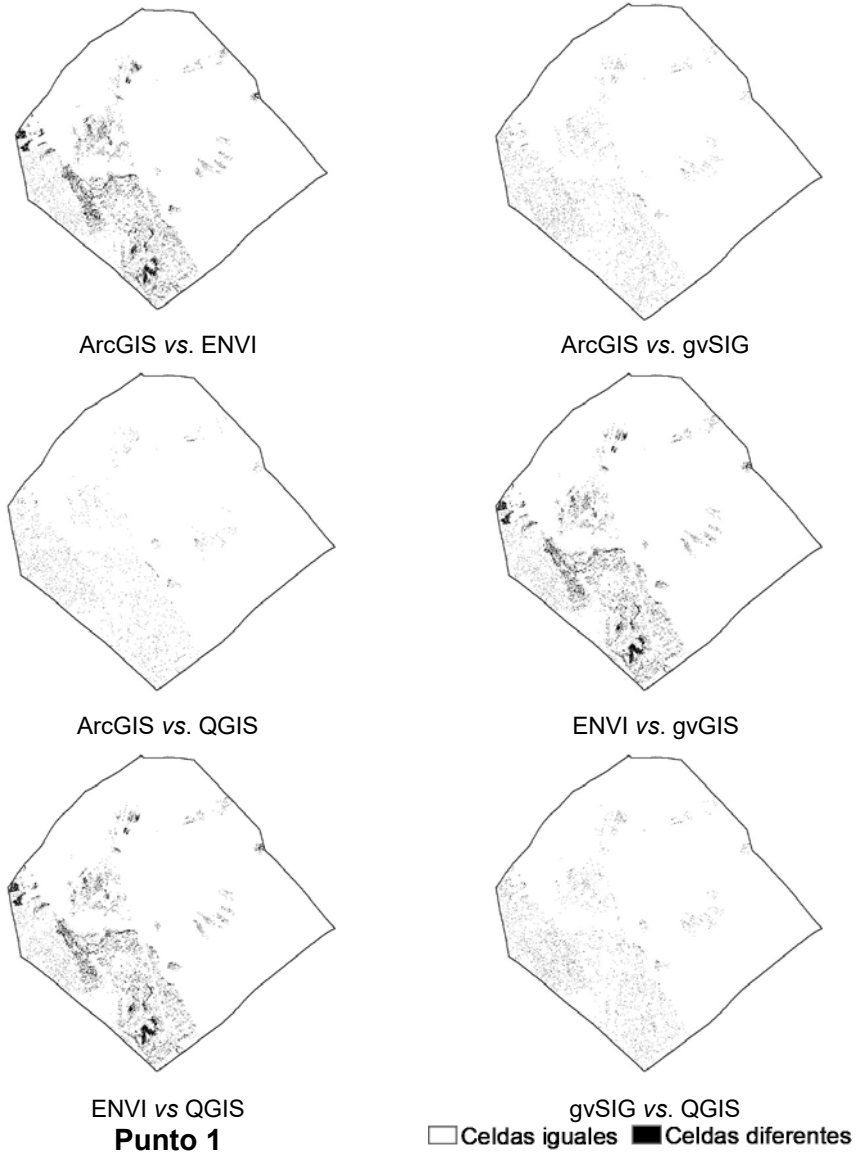
**Figura II. 4.** Cuenca visual del punto 4



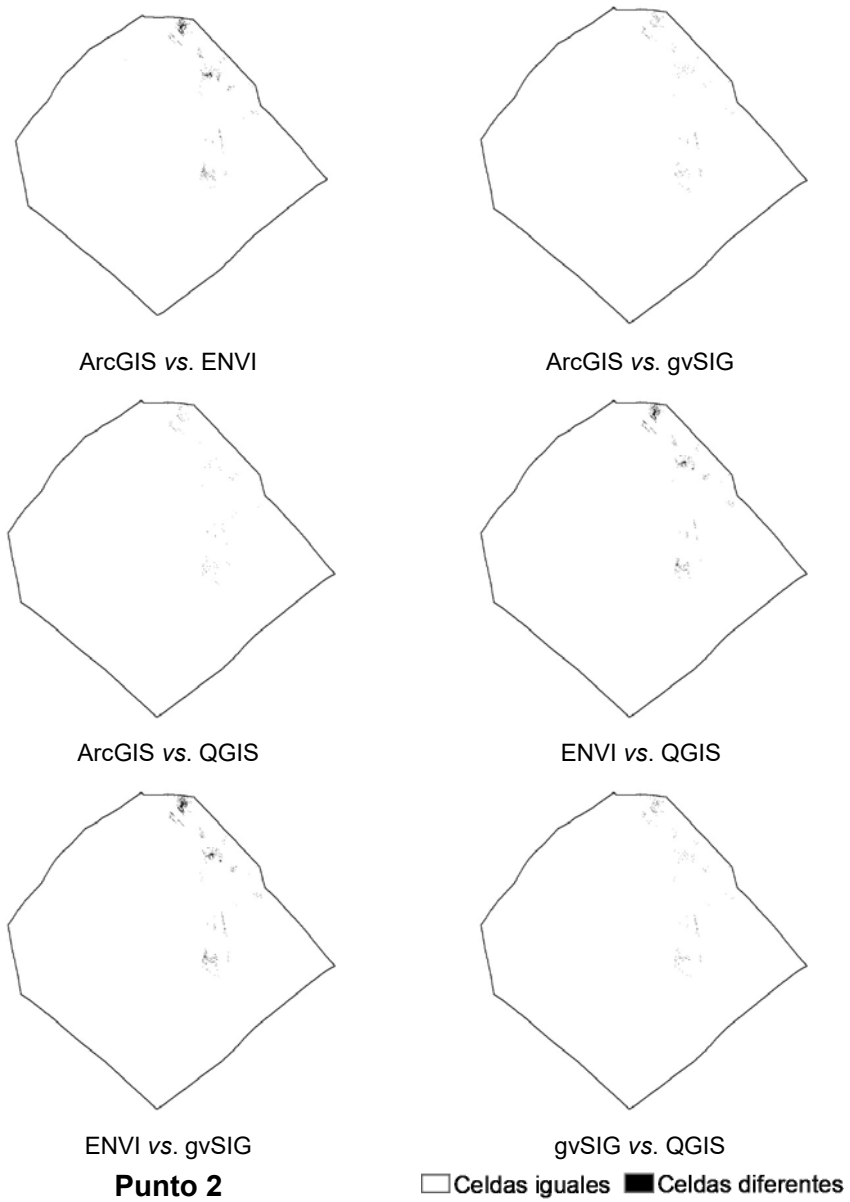


**Figura II. 5.** Cuenca visual del punto 5

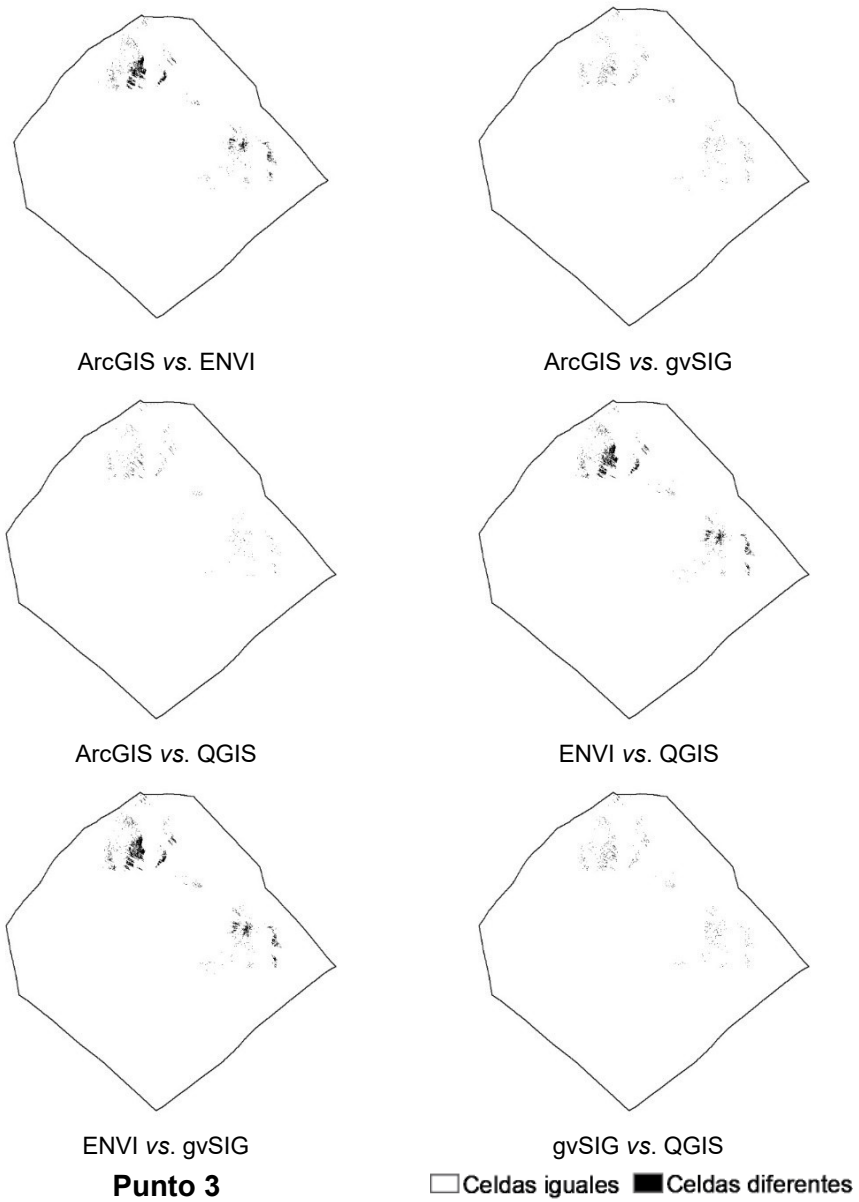
### 10.3 ANEXO III Diferencias entre cuencas visuales



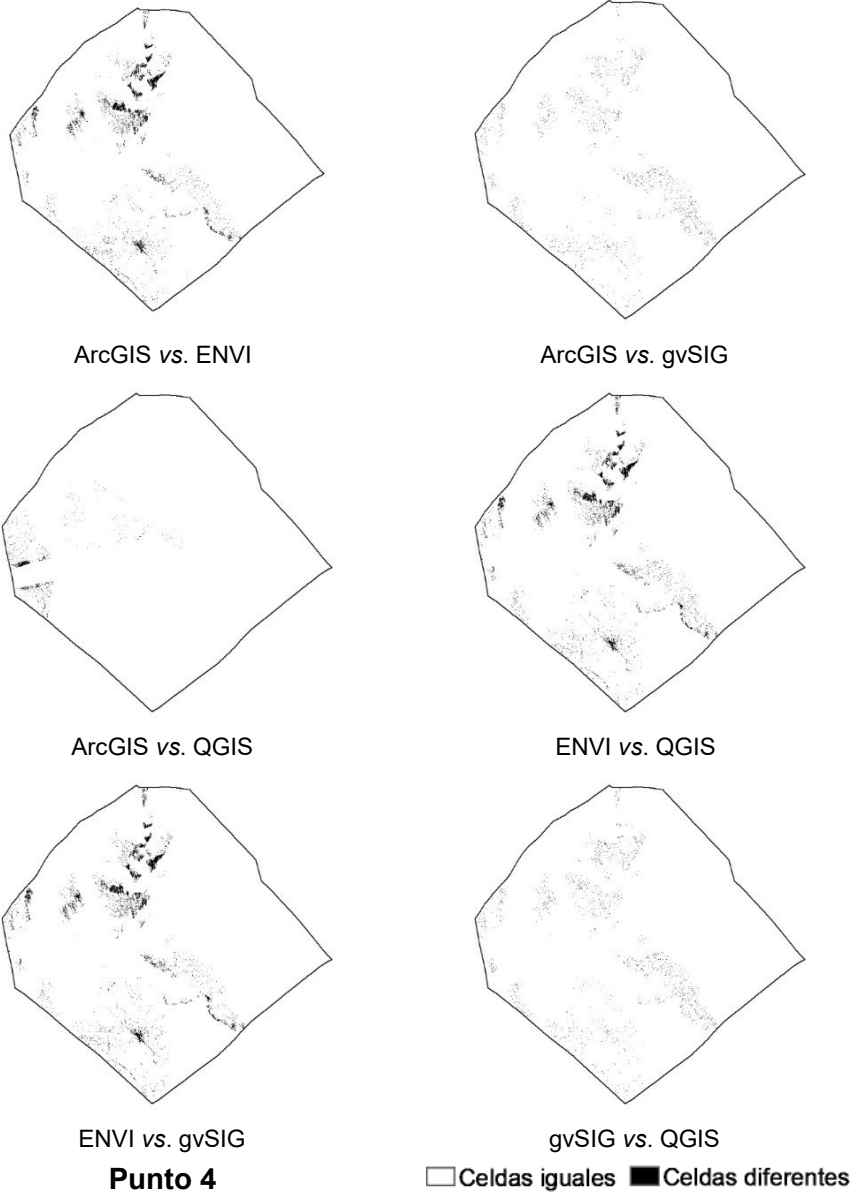
**Figura III. 1.** Diferencias cuencas visuales entre programas del punto 1



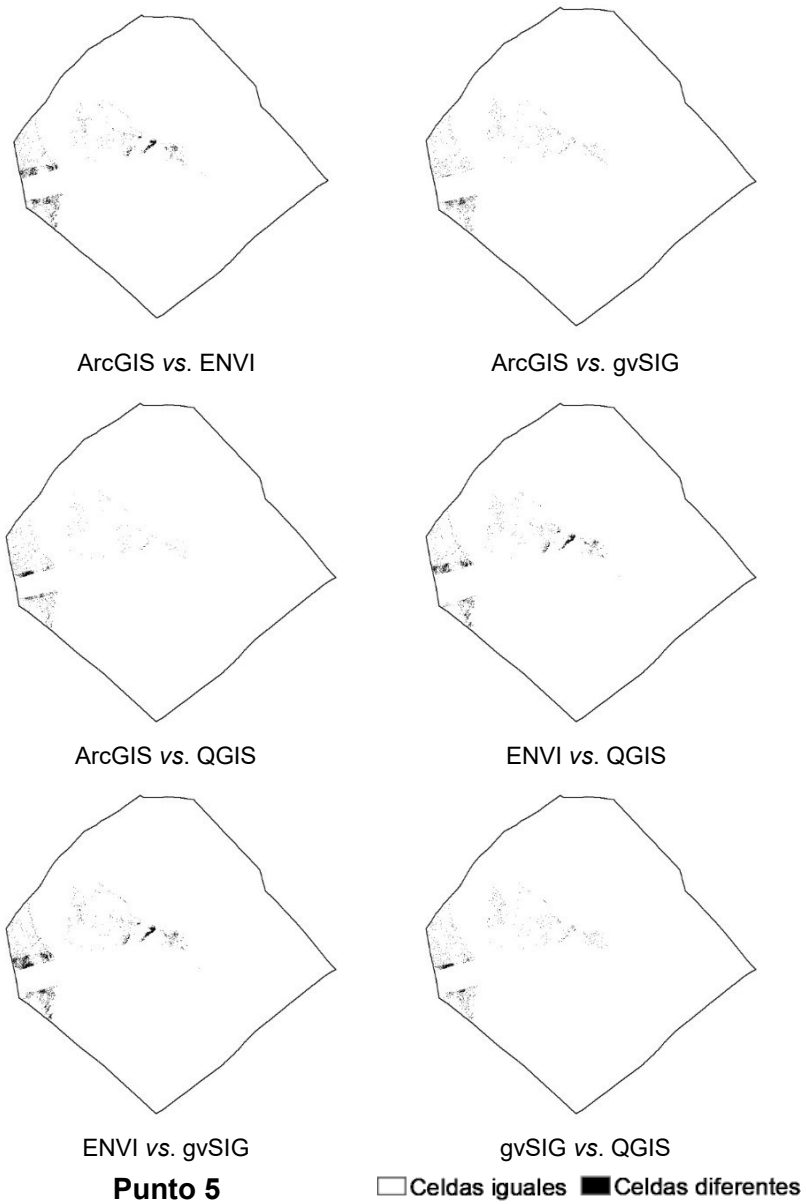
**Figura III. 2.** Diferencias cuencas visuales entre programas del punto 2



**Figura III. 3.** Diferencias cuencas visuales entre programas del punto 3



**Figura III. 4.** Diferencias cuencas visuales entre programas del punto 4



**Figura III. 5.** Diferencias cuencas visuales entre programas del punto 5