



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Geodésica,
Cartográfica y Topográfica

Inventariado geométrico de carreteras mediante
procesamiento automático de datos de mobile mapping

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Ingeniería Geomática y Geoinformación

AUTOR/A: Portalés Girona, Adrián

Tutor/a: Marqués Mateu, Ángel

Cotutor/a externo: Parejo Esparis, Victor Manuel

CURSO ACADÉMICO: 2023/2024

1. AGRADECIMIENTOS

En la realización de este proyecto debo de agradecer en gran medida el apoyo y la fe que he recibido por parte de mi jefe y compañero Víctor Parejo Esparis, ha sido un pilar fundamental durante todo el proceso con el cual he podido compartir una gran cantidad de dudas y problemas que han ido surgiendo. También debo agradecer a mi profesor y director de la escuela ETSIGCT, Ángel Marqués Mateu del cual he recibido guía y apoyo desde que empecé a tener clases con él, siendo de gran ayuda en este trabajo para guiarme y ser consciente de lo que he logrado durante todo este tiempo y en este proyecto.

Por último, agradecer al resto de mis compañeros de trabajo que me han apoyado en este proceso, a todos mis amigos y familiares que me han apoyado de forma directa o indirecta desde que empecé mis estudios.

2. COMPROMISO

"El presente documento ha sido realizado completamente por el firmante; no ha sido entregado como otro trabajo académico previo y todo el material tomado de otras fuentes ha sido convenientemente entrecomillado y citado su origen en el texto, así como referenciado en la bibliografía."

3. RESUMEN

El presente trabajo fin de máster se engloba en un proyecto mayor en el que se plantea desarrollar una herramienta con la cual realizar un inventariado geométrico de una vía lineal a través de su eje. Más concretamente este trabajo se centra en el desarrollo de una metodología con la que realizar la identificación geométrica de los elementos planimétricos del eje de la vía. Para ello se han dividido los posibles elementos a detectar en 3 tipos; rectas, curvas circulares y curvas de transición.

A día de hoy no existe una metodología automática o semiautomática que permita realizar este proceso de forma eficiente y rápida debido a la gran dificultad técnica que supone definir todos los elementos geométricos de una vía utilizando simplemente la geometría lineal del eje. En este trabajo se opta por desarrollar una aproximación metodológica que devuelva una respuesta con una exactitud y precisión adecuada asumiendo que se puedan producir una pequeña cantidad de errores que se puedan subsanar de forma “rápida”.

Actualmente la mayoría del inventariado geométrico anteriormente mencionado se realiza a través de un eje obtenido de una nube de puntos realizada mediante un sistema de cartografiado móvil (“Mobile Mapping System”, MMS) y se realiza el proceso de aproximación de un eje teórico utilizando el software “Civil 3D”, dicha metodología de trabajo es manual en su gran parte, lo que provoca que se vuelva muy costosa tanto temporalmente como económicamente. Existen otras metodologías al respecto que intentan abordar esta temática, pero o dependen en gran medida de la calidad del dato inicial siendo inviable en muchos casos su uso o al ser completamente automáticas en su conjunto no permiten cambios que ayuden a mejorar el resultado en cada caso que se plantee.

4. RESUM

El present treball de fi de màster s'emmarca en un projecte major en el qual es planteja desenvolupar una eina amb la qual realitzar un inventari geomètric d'una via lineal a través del seu eix. Més concretament, aquest treball se centra en el desenvolupament d'una metodologia per a realitzar la identificació geomètrica dels elements planimètrics de l'eix de la via. Per a això, s'han dividit els possibles elements a detectar en tres tipus: rectes, corbes circulars i corbes de transició.

A dia de hui, no existeix una metodologia automàtica o semiautomàtica que permeti dur a terme aquest procés de manera eficient i ràpida, a causa de la gran dificultat tècnica que suposa definir tots els elements geomètrics d'una via utilitzant simplement la geometria lineal de l'eix. En aquest treball, es proposa desenvolupar una aproximació metodològica que proporcione una resposta amb una exactitud i precisió adequada, assumint que es pugui produir una xicoteta quantitat d'errors que es puguin solucionar de manera "ràpida".

Actualment, la major part de l'inventari geomètric anteriorment mencionat es realitza a través d'un eix obtingut d'un núvol de punts realitzat mitjançant un sistema de cartografiat mòbil ("Mobile Mapping System", MMS), i es duu a terme el procés d'aproximació d'un eix teòric utilitzant el programari "Civil 3D". Aquesta metodologia de treball és, en gran part, manual, cosa que provoca que siga molt costosa tant temporalment com econòmicament. Hi ha altres metodologies que intenten abordar aquesta temàtica, però o depenen en gran mesura de la qualitat de la dada inicial, fent inviable en molts casos el seu ús, o al ser completament automàtiques en el seu conjunt, no permeten canvis que ajuden a millorar el resultat en cada cas que es plantege.

5. ABSTRACT

This master's thesis is part of a larger project aimed at developing a tool to carry out a geometric inventory of a linear route through its axis. More specifically, this work focuses on the development of a methodology to identify the geometric elements of the route's axis. For this purpose, the possible elements to be detected have been divided into three types: straight lines, circular curves, and transition curves.

To date, there is no automatic or semi-automatic methodology that allows this process to be carried out efficiently and quickly due to the great technical difficulty of defining all the geometric elements of a route using only the linear geometry of the axis. In this work, a methodological approach is developed to provide an accurate and precise result, assuming that a small number of errors may occur, which can be "quickly" corrected.

Currently, most of the aforementioned geometric inventory is carried out through an axis obtained from a point cloud generated by a Mobile Mapping System (MMS), and the process of approximating a theoretical axis is performed using "Civil 3D" software. This work methodology is largely manual, making it very costly both in time and money. Other methodologies exist that attempt to address this issue, but they either depend heavily on the quality of the initial data, making their use unfeasible in many cases, or, being fully automatic, do not allow adjustments that could improve the result in each specific case.

ÍNDICE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de las características angulares de los datos	10
Figura 2. Diagrama de la dirección angular de los datos	11
Figura 3. Diagrama comparativo del índice de calidad de la aproximación	12
Figura 4. Captura de la interfaz de la herramienta CurvS	13
Figura 5. Plano de localización de la vía CV170	14
Figura 6. Plano de situación de la vía CV17	14
Figura 7. Imagen del instrumento "Leica Pegasus Two"	15
Figura 8. Plano de situación ampliado para la vía CV170	15
Figura 9. Diagrama de flujo general de la metodología	17
Figura 10. Diagrama de flujo para la definición de los datos.....	18
Figura 11. Diagrama de flujo para la definición de la alineación básica del eje	18
Figura 12. Plano del resultado de la alineación básica de la vía CV170.....	19
Figura 13. Diagrama de flujo de la aproximación de las circulares	20
Figura 14. Gráfico de la clasificación por grupos de los puntos de la curva ID=52	21
Figura 15. Plano de las circunferencias aproximadas en la vía CV170	22
Figura 16. Plano de las circunferencias aproximadas en la curva ID=52	22
Figura 17. Diagrama de flujo del filtrado y definición de las curvas circulares	23
Figura 18. Plano de las curvas circulares definidas en la vía CV170.....	23
Figura 19. Plano de ejemplo de las curvas circulares definidas en la vía CV170	24
Figura 20. Diagrama de flujo de los elementos de transición	25
Figura 21. Plano de la circular de unión definida en la curva ID=52	26
Figura 22. Plano de ejemplo de unión de circulares mediante el método tangente	27
Figura 23. Diagrama de flujo para la definición de las clotoides	27
Figura 24. Plano de ejemplo de las clotoides definidas	29
Figura 25. Plano de ejemplo de las curvas circulares de transición definidas.....	29
Figura 26. Interfaz de la herramienta desarrollada en QGIS	30
Figura 27. Tabla de atributos de ejemplo del resultado	31
Figura 28. Plano de la alineación teórico definida	32
Figura 29. Ejemplo de la alineación teórica definida.....	32
Figura 30. Gráfico de caja y bigotes de los errores de los tipos de geometría	33
Figura 31. Captura de los elementos considerados errores groseros	33
Figura 32. Elemento recto clasificado como error grosero	34
Figura 33. Elemento circular clasificado como error grosero	34
Figura 34. Elemento clotoide clasificado como error grosero	35
Figura 35. Gráfico de caja y bigotes de los errores por tipo de geometría tras filtrar los valores atípicos.....	36
Figura 36. Plano del eje teórico definido mediante Civil 3D	37
Figura 37. Gráfico de caja y bigotes de los errores por tipo de geometría del eje definido en Civil 3D	37
Figura 38. Tabla de niveles de los trabajadores según convenio de ingenieros y oficinas técnicas	39

ÍNDICE TABLAS

Tabla 1. Estadísticos básicos del error por tipo de geometría del eje teórico	33
Tabla 2. Estadísticos básicos del error por tipo de geometría del eje teórico filtrado	35
Tabla 3. Estadísticos básicos del error por tipo de geometría del eje obtenido de Civil 3D	37
Tabla 4. Remuneración de los trabajadores por el convenio de ingenieros y oficina técnica	39
Tabla 5. Coste de los trabajadores por el convenio de ingenieros y oficina técnica para la empresa	39
Tabla 6. Costes de los materiales empleados en el proyecto	39
Tabla 7. Costes totales del proyecto	39

ÍNDICE ECUACIONES

Ecuación 1. Ecuación explícita de la recta	11
Ecuación 2. Ecuación de una circunferencia	11
Ecuación 3. Índice de la calidad de la aproximación	11
Ecuación 4. Ecuación explícita de la recta	16
Ecuación 5. Ecuación de la circunferencia	16
Ecuación 6. Ecuaciones X e Y de la clotoide	16
Ecuación 7. Ecuaciones X e Y en desarrollo en serie de la clotoide	16
Ecuación 8. Ecuación de los pesos utilizados en MMCC.....	20
Ecuación 9. Ecuación Y en desarrollo en serie de Taylor de la clotoide.....	28
Ecuación 10. Ecuación de la longitud de la clotoide en el punto de tangencia	28
Ecuación 11. Ecuación Y en desarrollo en serie de Taylor en el punto de tangencia de la clotoide	28
Ecuación 12. Ecuación de la homotecia de la clotoide en la coordenada Y	28

ÍNDICE

1. AGRADECIMIENTOS.....	1
2. COMPROMISO	2
3. RESUMEN.....	3
4. RESUM.....	4
5. ABSTRACT.....	5
6. INTRODUCCIÓN.....	9
7. OBJETIVO.....	13
8. ZONA DE ESTUDIO	14
9. DATOS.....	15
10. METODOLOGÍA	16
1. ELEMENTOS TEÓRICOS.....	16
11. RESULTADOS	31
12. PRESUPUESTO	39
13. CONCLUSIONES.....	40
14. BIBLIOGRAFÍA.....	41
15. ANEXOS.....	42

6. INTRODUCCIÓN

Hoy en día la creciente necesidad de información geográfica 3D lo más completa posible está provocando un incremento en el uso de la información geográfica de las vías de comunicación. Esto es debido a los múltiples usos que puede tener dicha información en la actualidad, ya sea en forma de estudios estadísticos de accidentes, estudios de cumplimiento de normativa de las vías de comunicación o la gestión de carreteras entre otros.

Este hecho crea una necesidad de definir una metodología de trabajo completa que ofrezca unos resultados viables a nivel métrico y teórico, a la vez que se busca minimizar el tiempo y coste del proceso. Actualmente, la metodología más utilizada a nivel profesional es un planteamiento en su mayor parte manual que se basa en la utilización del software “Civil 3D” para aproximar el mejor eje teórico posible.

En el planteamiento comentado se utiliza una longitud del eje de la vía que permita un buen manejo en “Civil 3D” y se realiza una primera aproximación automática geométrica teórica del eje. Sin embargo, con este método en la primera aproximación suelen crearse muchos elementos con errores groseros. Dicho software utiliza la normativa actual de carreteras en España para realizar dicha primera aproximación automática, por lo tanto los errores groseros se ven incrementados en las carreteras más antiguas y de zona montañosa donde no suelen cumplir las características mínimas que demanda la normativa. Una vez definida la primera aproximación, se modifican los diferentes elementos que lo conforman el eje cambiando sus parámetros para mejorar la aproximación hasta que se consiga un resultado satisfactorio. Como se puede deducir el desarrollo descrito anteriormente es una forma de trabajo principalmente manual e iterativa que depende en gran medida del resultado de la primera aproximación y la experiencia del técnico que realice el trabajo, lo que lo convierte en un método muy costoso.

Hasta el día de hoy, existen varios proyectos donde se desarrollan diferentes tipos de metodologías donde se busca una mayor automatización del trabajo. A continuación, se hace una breve explicación general de las bases de dichos trabajos, para entender el estado actual de los avances existentes en este campo.

Por un lado, en el doctorado (**Holgado 2016**) se describe una metodología automática completa para alzado, planta y sección. En dicho proyecto, se muestran 3 publicaciones diferentes en revistas científicas donde en cada una se desarrolla un procedimiento para cada parte. En la publicación relacionada con la planimetría se explica y desarrolla una metodología basada única y exclusivamente en los valores de curvatura de los puntos que definen el eje de la vía (Figura 1).

El procedimiento se basa en clasificar como recta los grupos de puntos que muestren valores de curvatura 0 y una tendencia constante con una tolerancia que se define en función del radio mínimo detectable, como curva circular aquellas agrupaciones de puntos que muestren una curvatura diferente a 0 y muestren una tendencia constante con la misma tolerancia, y por último las clotoides o espirales de Cornú se asignan a las agrupaciones de puntos que muestran una variación lineal de la curvatura, buscando la recta que una la pareja de elementos recta-circular para definir sus parámetros.

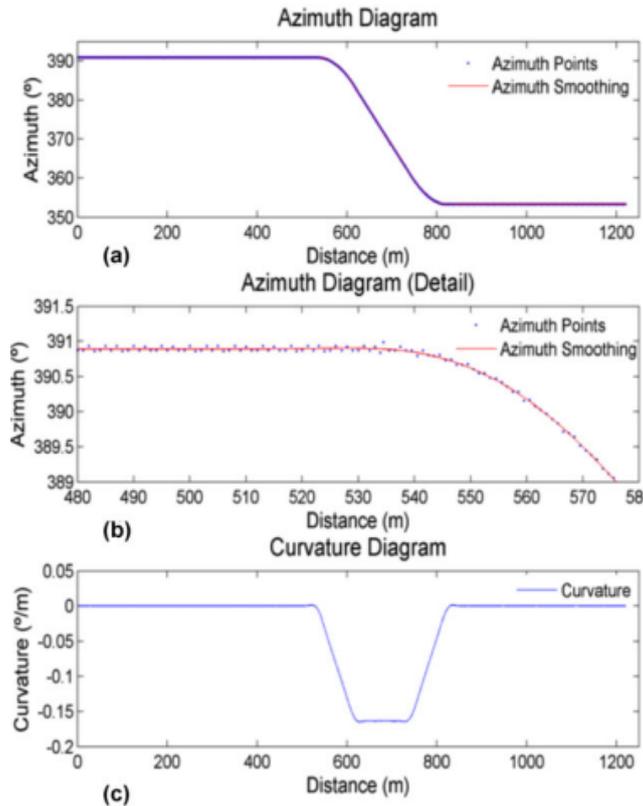


Figura 1. Diagrama de las características angulares de los datos

Esta metodología presenta muy buenos resultados tal y como se muestra en la tesis doctoral, sin embargo es necesario un tratamiento exhaustivo de las nubes de puntos como se muestra al inicio del proyecto para definir los puntos que definirán el eje, lo que la convierte en una metodología muy exigente en el tratamiento del dato y unos conocimientos técnicos avanzados.

Existe otro trabajo con unas bases parecidas al anterior (**Cantisani, Del Serrone 2020**), sin embargo en vez de intentar determinar los parámetros de los elementos a partir de la curvatura de los puntos que los conforman, realiza aproximaciones mediante el método de mínimos cuadrados (MMCC). En contra de la metodología del artículo anterior, este proyecto centra sus esfuerzos en determinar los puntos de inflexión entre elementos o lo que es lo mismo, determinar los puntos de inicio y final de cada elemento, para ello se estudian los cambios de tendencia de la curvatura (Figura 2).

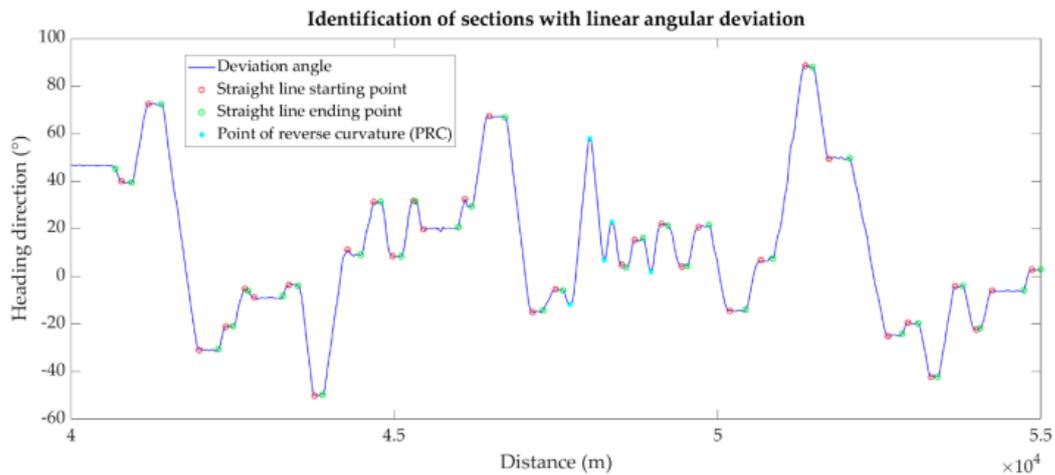


Figura 2. Diagrama de la dirección angular de los datos

Una vez determinados los puntos de inflexión se agrupan los puntos que conforman cada elemento para definir sus parámetros empleando aproximaciones mediante MMCC, de esta forma se pueden definir las curvas circulares y las rectas, sobre las clotoides que nombran al principio, no se hace una explicación directa de cómo se definen pero seguramente sea igual que con la metodología anterior.

Por otro lado, el artículo (Di Mascio, Di Vito, Loprencipe, Ragnoli 2012) ofrece un enfoque diferente basado en aproximaciones por MMCC, pero usando principalmente las coordenadas de los puntos. El procedimiento se basa en aplicar MMCC en todo el eje para la ecuación correspondiente a una recta como para la ecuación correspondiente a una curva circular y elegir qué elementos se ajustan mejor a los puntos del eje en cada momento.

$$y = mx + b$$

Ecuación 1. Ecuación explícita de la recta

$$(x - x_c)^2 + (y - y_c)^2 = R^2$$

Ecuación 2. Ecuación de una circunferencia

Para ello se utiliza un índice de la calidad de la aproximación (RQI) definido en función de la diferencia entre los elementos aproximados respecto al eje original. En ambos casos el índice sigue la misma ecuación y lo que varía es la forma en la que se consigue la distancia respecto al eje (Figura 3).

$$RQI = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n d_i^2}{n}}$$

Ecuación 3. Índice de la calidad de la aproximación

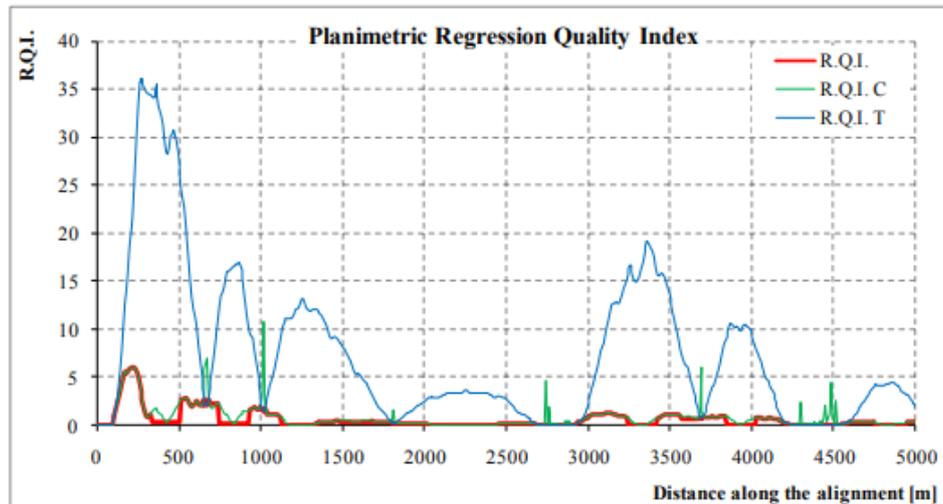


Figura 3. Diagrama comparativo del índice de calidad de la aproximación

Como se puede observar, para esta metodología se necesita definir una ventana de puntos los cuales utilizar para las aproximaciones tanto para rectas como para circulares. Seleccionar una buena ventana es algo crítico en esta metodología dado que, en función de la calidad de los datos la muestra de puntos puede ser muy pequeña y los efectos locales en sus valores afecten en gran medida a los resultados, o en contra si la muestra es muy grande se comprometa la detección de las curvas por el suavizado que se produce. Con el fin de evitar este problema, se realizan estudios de sensibilidad previos donde se tiene en cuenta el tipo de carretera, diferentes valores de ventana posibles, valores mínimos de radio a detectar, valores mínimos de longitud de arcos a detectar y la precisión de las técnicas de obtención de datos utilizadas.

Por último, en el artículo (**Bartin, Demiroglu, Ozbay, Jami 2022**) se explica cómo funciona la herramienta desarrollada denominada "CurvS Tool". Este proyecto en contra de los anteriores, no limita la determinación de los elementos del eje a uno o dos tipos de datos como la curvatura y la posición como se ha utilizado hasta ahora. En esta metodología se definen las variables:

- Azimuth (θ)
- Curvatura (k)
- Variación de Azimuth ($\Delta\theta$)
- Distancia entre vértices consecutivos (dL)
- Hito kilométrico (MP)
- Radio calculado utilizando el método de la cuerda (R)
- Radio de un círculo circunscrito (RCC)
- Cambio acumulativo en los ángulos de orientación en tres puntos consecutivos (S)
- La diferencia en los ángulos de orientación acumulados alrededor de cada vértice (I).

Con toda esta información en cada punto se crean vectores de información que describen cada punto y con toda esta información se realiza una clasificación cluster con el fin de agrupar los puntos que define cada elemento dado que compartirán características aquellos puntos que conformen un único elemento (Figura 4).

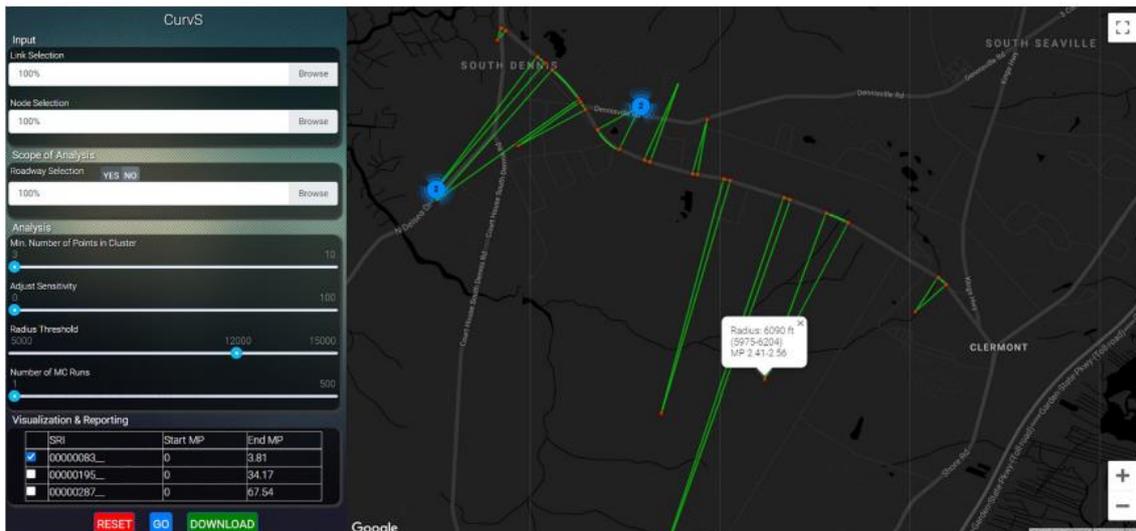


Figura 4. Captura de la interfaz de la herramienta CurvS

Además de esto, la herramienta que se desarrolla ofrece la posibilidad de modificar unos parámetros iniciales para moldear las características empleadas para la definición de los resultados como pueden ser el número mínimo de puntos por cluster, número de iteraciones o el radio mínimo de las curvas circulares. Este proyecto presenta un gran cambio en el enfoque de su metodología y la posibilidad de modificar parámetros para adaptar la metodología a su dato de entrada y mejorar su resultado.

7. OBJETIVO

Este proyecto tiene como objetivo principal desarrollar una metodología que permita determinar de forma fiel los elementos geométricos teóricos que forman el eje de la vía, realizándolo de una forma lo más automática posible para reducir en gran medida su coste de realización y su tiempo de realización. Con este fin se definen los siguientes objetivos específicos:

- Poder definir con coherencia rectas, curvas circulares y clotoides.
- La metodología debe de poder dar un buen resultado sin necesidad de unos datos con un tratamiento exhaustivo o con características muy específicas.
- La metodología debe de permitir adaptar las tolerancias o especificaciones iniciales para poder mejorar los resultados.

El desarrollo se ha producido en la empresa BECSA del grupo Simetría donde el autor del proyecto ejerce su actividad profesional actualmente.

8. ZONA DE ESTUDIO

La zona de estudio corresponde a una sección de una carretera situada en la parte norte de la Comunidad Valenciana y la parte este de la Comunidad autónoma de Aragón. Se sitúa entre las provincias de Castellón y Teruel, entre los municipios de Vistabella del Maestrat y Puertomingalbo (Figura 5 y 6), esta zona muestra una orografía más accidentada, por lo tanto una carreteras con unas características más marcadas como giros más pronunciados o cambios bruscos de dirección.

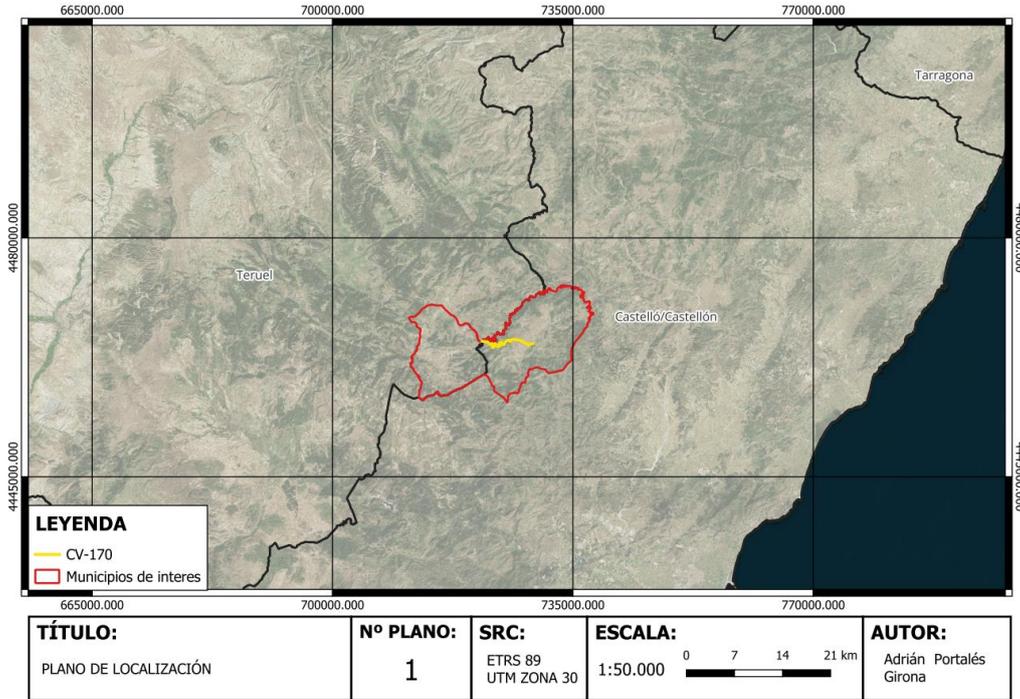


Figura 5. Plano de localización de la vía CV170

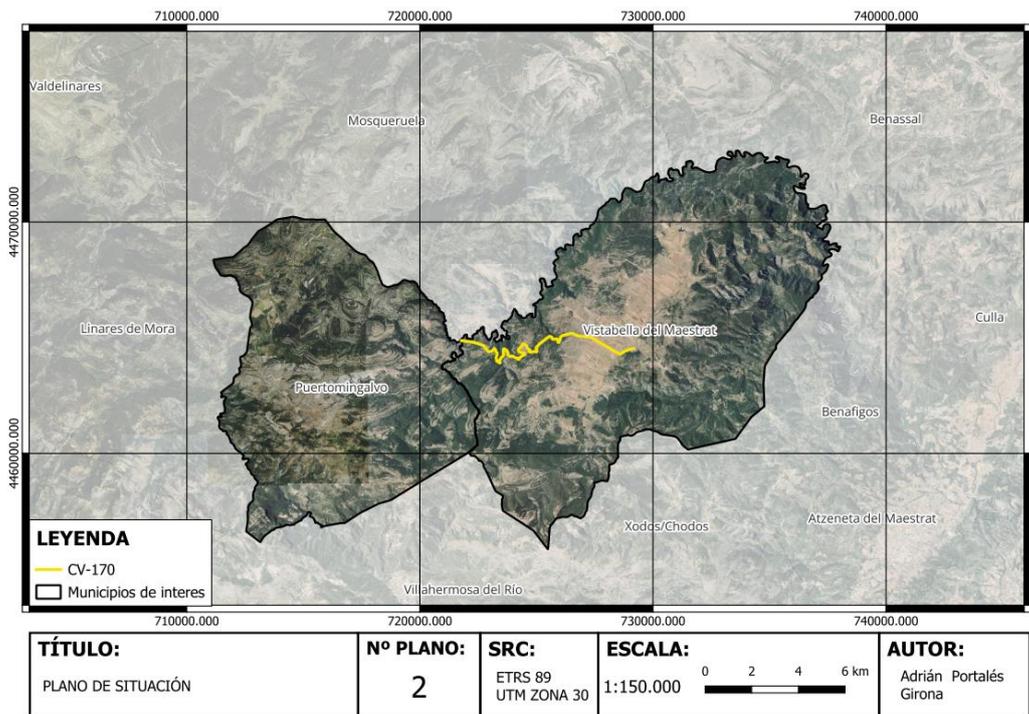


Figura 6. Plano de situación de la vía CV17

9. DATOS

Los datos empleados en este estudio son ejes de carreteras obtenidos en una campaña de toma de datos mediante Mobile Mapping en mayo de 2024. Estos datos se han recogido empleando el instrumento "Leica Pegasus Two" (Figura 7), un sistema de captura masiva de información en cinemático que ofrece una captura de 1 millón de puntos por segundo. De este instrumental se obtiene una nube de puntos la cual se selecciona por valor de intensidad los puntos que forman parte de la banda blanca central, para con ellos el software definir la línea del eje.



Figura 7. Imagen del instrumento "Leica Pegasus Two"

Esta es la forma más extendida de trabajo en este ámbito y existen problemas a resolver al emplear dicho método. El más común se encuentra en las carreteras donde no existan marcas viales en la parte central de la vía o se encuentre tan deteriorada que no sea viable su uso. También existe la problemática de los cambios de anchura en la vía, es decir los sobrecanchos, que no modifican la trayectoria de la banda blanca central en caso de existir dejando dicha característica sin contemplar en el dato final.

En el proyecto se empleará un eje que define parte de la carretera CV170 que contiene partes más rectas o suaves y partes con giros más cerrados para poder comprobar el comportamiento de la herramienta desarrollada en casos diferentes y variados (Figura 8).

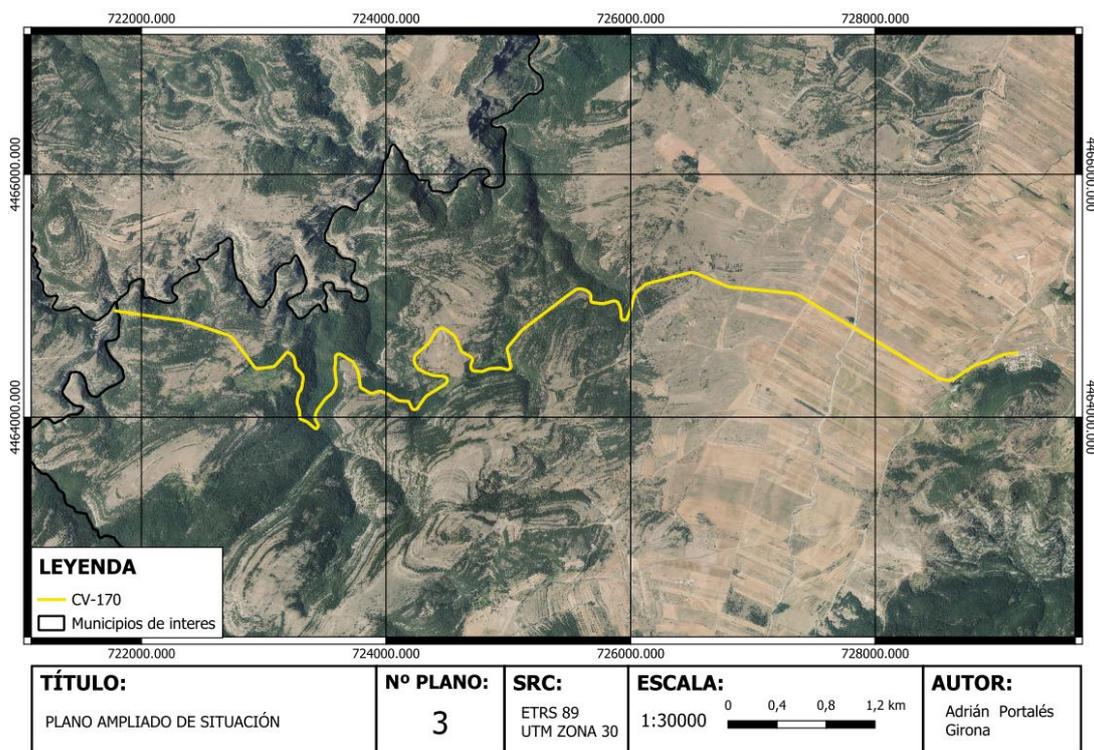


Figura 8. Plano de situación ampliado para la vía CV170

10. METODOLOGÍA

Respecto a la metodología empleada en este proyecto, partiendo del eje de la vía se van aplicando ciertos procesos dependientes de los resultados conforme se avanza en la metodología para seguir deduciendo elementos teóricos del eje. En primer lugar, se definen los elementos rectos y curvos, en segundo lugar las circulares “primarias” y por último los elementos de transición entre curvas y entre rectas y curvas.

1. ELEMENTOS TEÓRICOS

- **Recta:** es una geometría euclidiana definida por una dirección que no varía en todo su recorrido pudiéndose definir en el plano con la siguiente ecuación lineal.

$$y = mx + b$$

Ecuación 4. Ecuación explícita de la recta

- **Circular:** es una curva plana en la que todos los puntos se encuentran a una distancia constante (radio) de un punto fijo llamado centro. Es una figura bidimensional con una variación constante en su dirección que se puede definir matemáticamente con la siguiente ecuación.

$$(x - x_c)^2 + (y - y_c)^2 = R^2$$

Ecuación 5. Ecuación de la circunferencia

- **Clotoide:** también conocida como espiral de Euler o espiral de Cornu, es una curva plana cuya principal característica es que su curvatura varía de forma lineal respecto su longitud del arco. Esto significa que la curvatura es 0 en un extremo y aumenta a medida que avanza a lo largo de la curva. Existen varios parámetros que definen una clotoide:
 - **A:** parámetro de la clotoide
 - **R:** radio final de la clotoide
 - **L:** Longitud total de la clotoide
 - **Tau:** Ángulo que forma la tangente en el punto final de la clotoide respecto a la dirección de referencia

Además, de forma muy generalizada en vez de utilizar las ecuaciones teóricas de la clotoide, dada a su complejidad de cálculo, se emplea un desarrollo en serie de Taylor de las ecuaciones, donde el resultado ya se considera adecuado a partir del tercer término, teniendo las siguientes ecuaciones:

$$x = \int_0^s \cos\left(\frac{s^2}{2A^2}\right) ds \quad y = \int_0^s \sin\left(\frac{s^2}{2A^2}\right) ds$$

Ecuación 6. Ecuaciones X e Y de la clotoide

$$x = s \left(\frac{\alpha}{3} - \frac{\alpha^3}{42} - \frac{\alpha^5}{1320} \right) \quad y = s \left(1 - \frac{\alpha^2}{10} - \frac{\alpha^4}{216} - \frac{\alpha^6}{9360} \right)$$

Ecuación 7. Ecuaciones X e Y en desarrollo en serie de la clotoide

Antes de empezar el desarrollo de toda la metodología se realizan unas aclaraciones previas para entender su premisa y sus bases. En esta metodología no se tienen en cuenta todas las combinaciones posibles que existen en el diseño de carreteras, en este ámbito existen muchas combinaciones de elementos posibles, sin embargo en la metodología desarrollada se simplifican a la búsqueda de la combinación básica recta-clotoide-circular-clotoide-recta.

En muchos casos esta combinación de elementos no se produce, teniendo casos de circulares tangentes a rectas (recta-circular-recta) o combinaciones de circulares compuestas con clotoides. En esta metodología se obvian algunas combinaciones posibles, como por ejemplo clotoides de vértice.

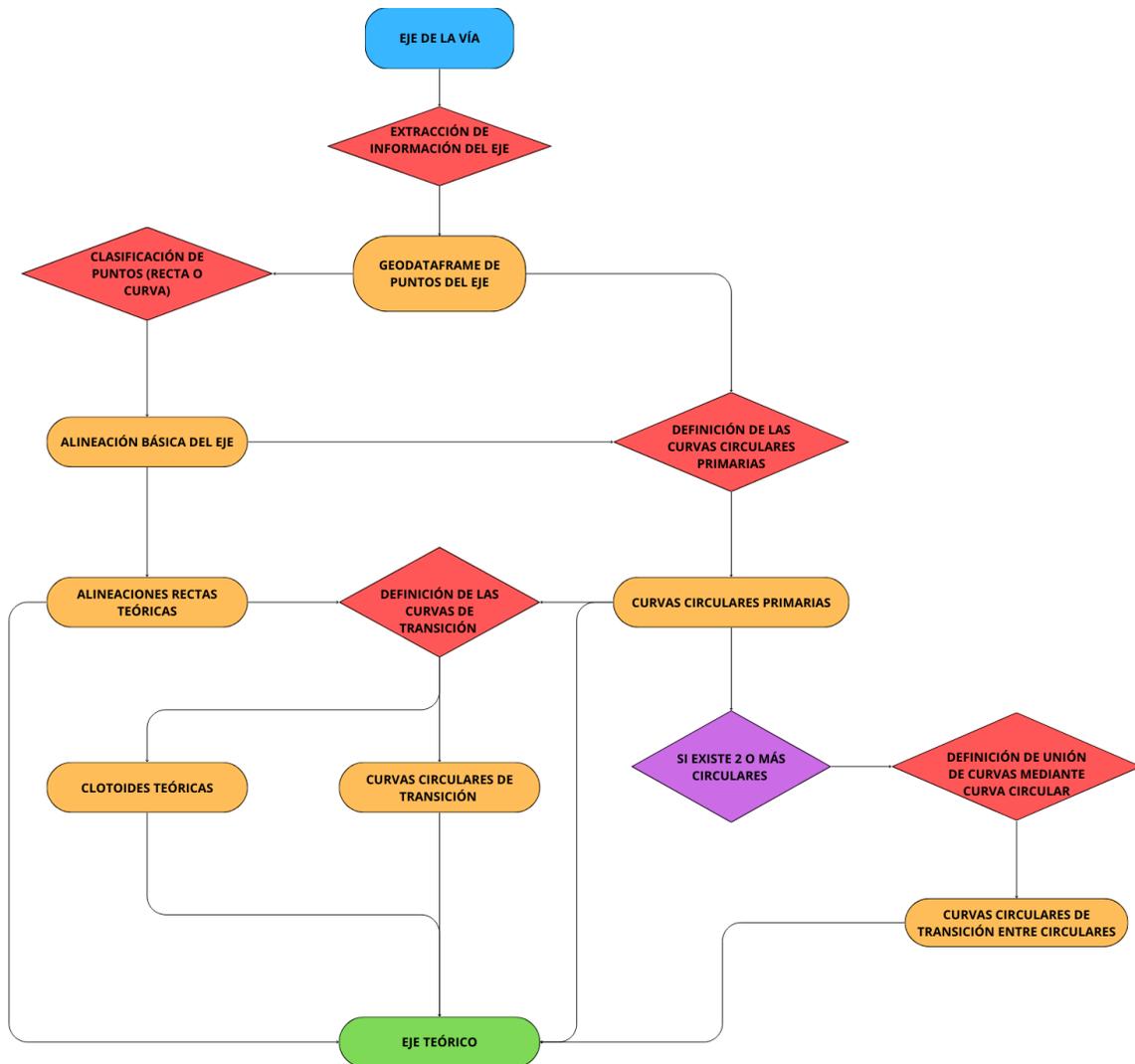


Figura 9. Diagrama de flujo general de la metodología

Más concretamente como se observa en el diagrama de flujo de la figura 9, del eje inicial se define un “GeoDataframe” de los puntos que lo conforman con características asociadas a cada uno como “Azimuth” o “Radio”, tal y como se observa en el diagrama de flujo de la figura 10. Un “GeoDataframe” es una tabla de datos tabulares que ofrece la capacidad de determinar para cada registro una geometría, lo que permite realizar un abanico variado de operaciones espaciales con dichas geometrías. Esta tabla es el dato básico con el cual se obtendrán los diferentes resultados de todo el proyecto.

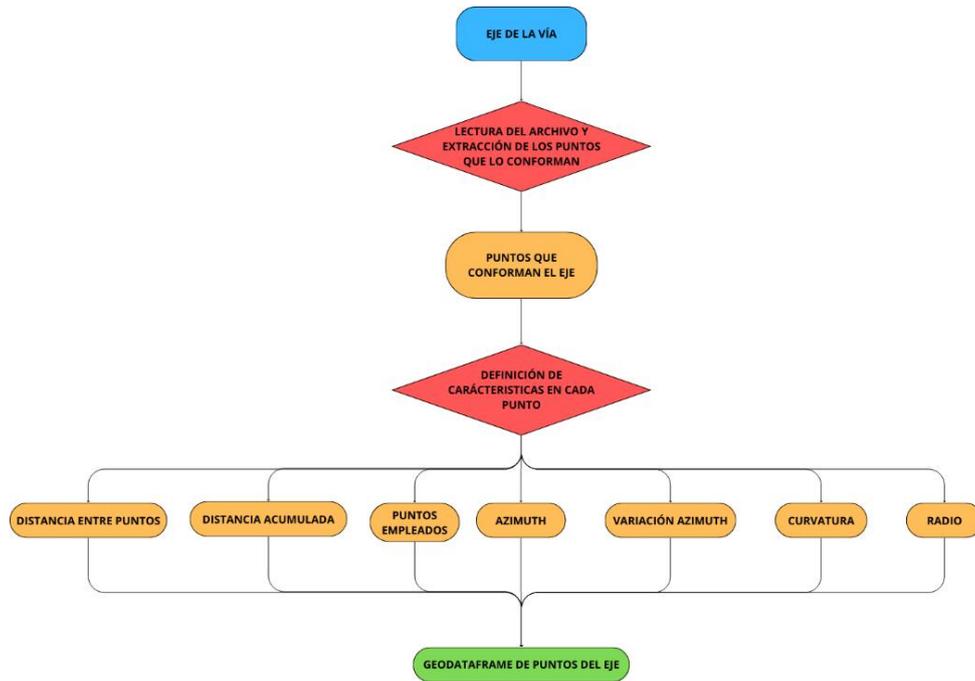


Figura 10. Diagrama de flujo para la definición de los datos

En primer lugar, se divide y agrupa los puntos en diferentes elementos que se diferencian entre elementos rectos y elementos curvos como se muestra en el diagrama de flujo de la figura 11. Para ello, se establece un valor de variación angular entre puntos a criterio del técnico y un valor de radio mínimo para que un punto se considere parte de un elemento curvo. Además, en los elementos curvos se realiza una división de los elementos en función del sentido de giro que defina el signo de su radio, obteniendo así un “GeoDataframe” que guarda esta alineación básica creada y con atributos propios para cada tipo de elemento (Figura 12).

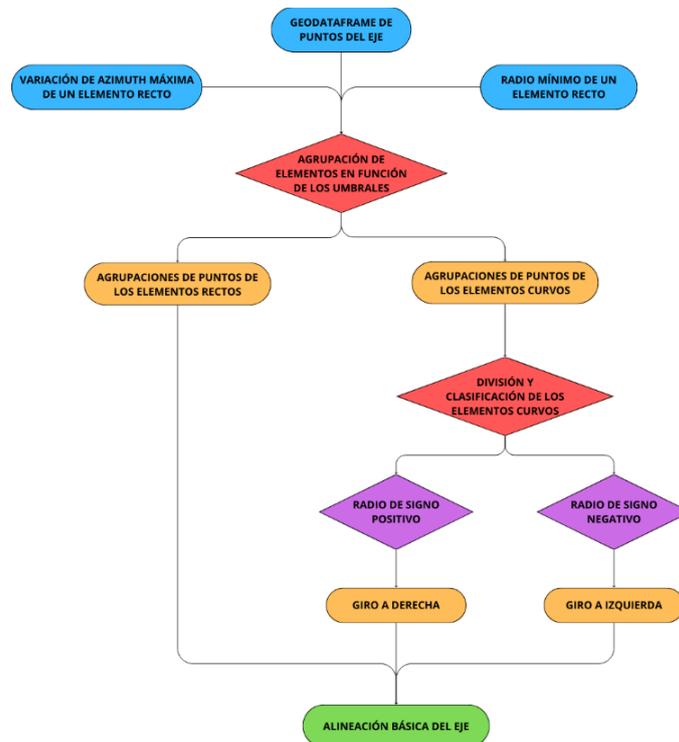


Figura 11. Diagrama de flujo para la definición de la alineación básica del eje

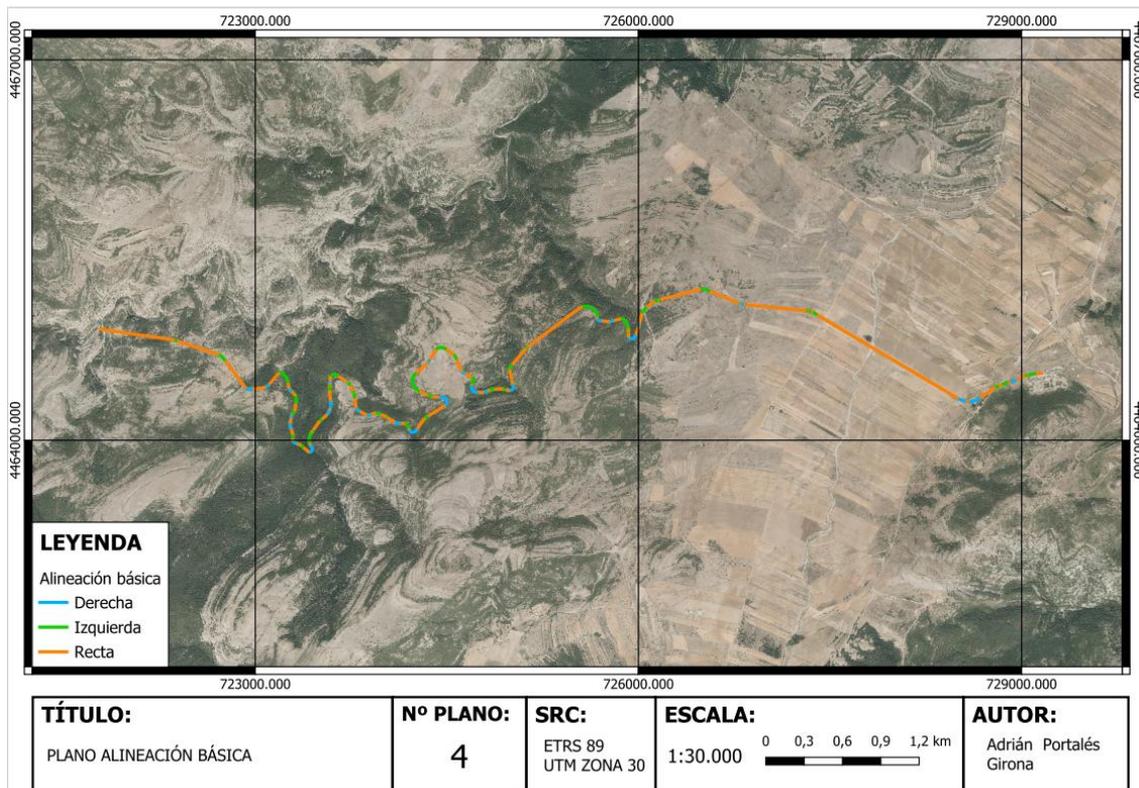


Figura 12. Plano del resultado de la alineación básica de la vía CV170

En segundo lugar, determinados los elementos curvos del eje se procede a definir unas primeras curvas circulares “principales” que se encuentren en dichos elementos. Con este fin, como se observa en el diagrama de flujo de la figura 13 se realiza un estudio de los puntos que conforman los elementos curvos para realizar una clasificación cluster de los mismos en función de su posición y curvatura, para determinar las agrupaciones con una curvatura mayor dado que estos puntos tienen mayor posibilidad de formar parte de una curva circular en el caso de existir más de dos agrupaciones, en caso contrario se aproxima una circular en ambos grupos.

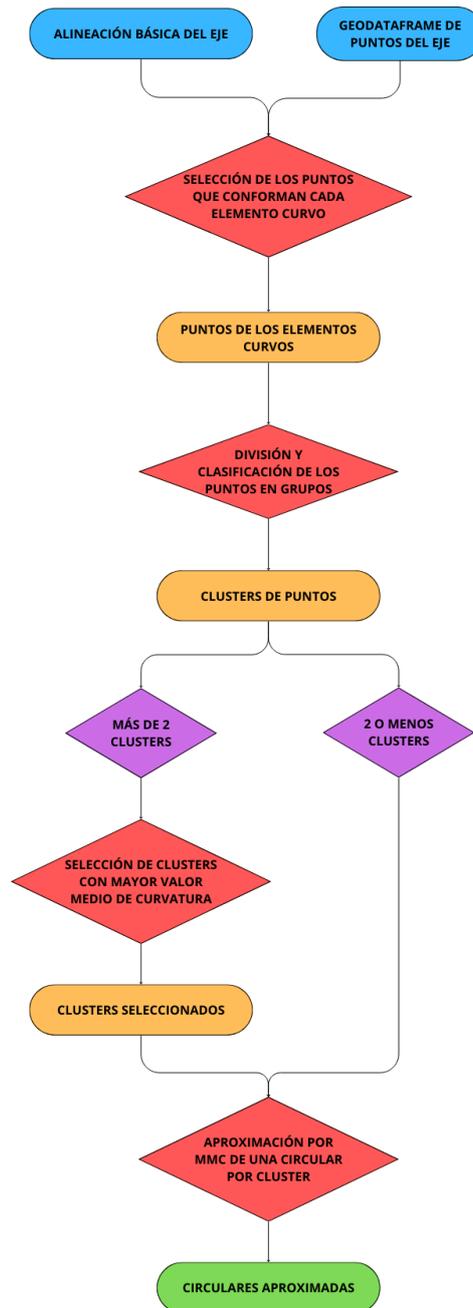


Figura 13. Diagrama de flujo de la aproximación de las circulares

Clasificados en clusters, en función de cuantos existan en cada curva se realizan dos procedimientos diferentes. En caso de tener 1 o 2 clusters se realiza una aproximación iterativa para cada agrupación de una circunferencia, usando todos los puntos de cada cluster de forma que en cada iteración se recalculen los pesos de los puntos empleados (W), siendo estos inversamente proporcionales a su error en la última iteración (E) y directamente proporcionales a su valor de curvatura asociado (K).

$$w = \frac{K}{E}$$

Ecuación 8. Ecuación de los pesos utilizados en MMCC

De esta forma se obtiene tantas circunferencias como agrupaciones existan, en este caso 1 o 2. Por otro lado, si existen más de 2 agrupaciones, para evitar asociar circulares a elementos de transición como son las clotoides, se realiza un filtrado previo de grupos en el que se aproximarán los grupos de puntos que presenten un valor medio mayor al primer cuantil de los datos.

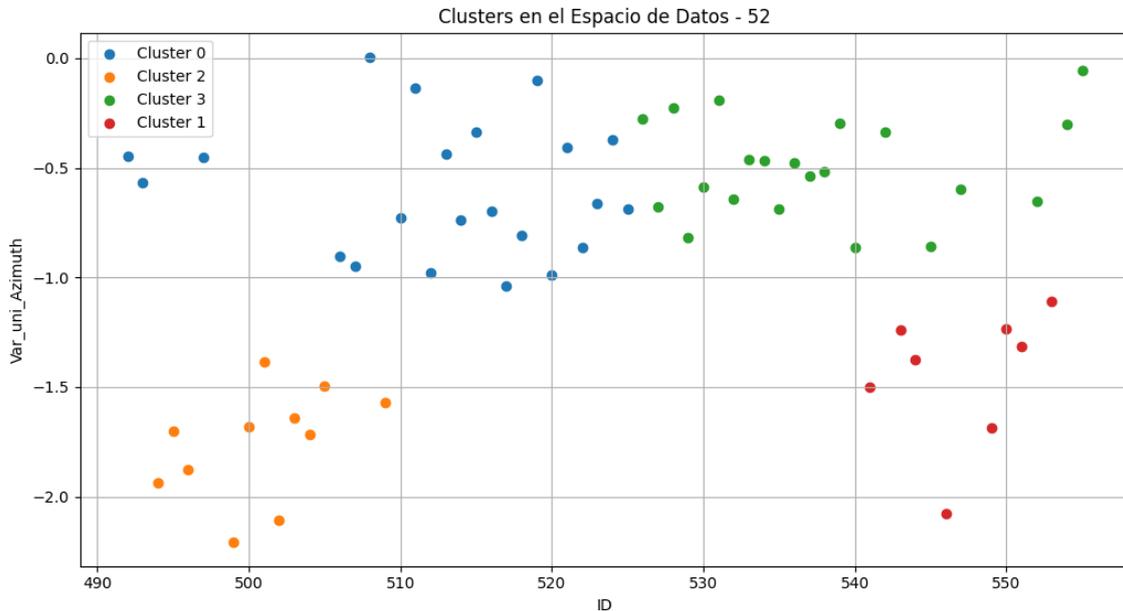


Figura 14. Gráfico de la clasificación por grupos de los puntos de la curva ID=52

Este filtrado se hace con el fin de eliminar los puntos más parecidos a una curva de transición usando su tendencia a disminuir su curvatura hasta llegar a 0 donde se unen con rectas, se puede observar este efecto en el gráfico de la figura 14 en el cual se diferencian dos grupos con mayor valor de curvatura en valor absoluto, que son los que terminan seleccionados y utilizados posteriormente como se muestra en el plano de la figura 16. De esta forma se calculan las aproximaciones circulares mediante una aproximación por MMCC (Figuras 15 y 16) como se ha comentado en los párrafos anteriores empleando las agrupaciones de puntos que presentan unas características más próximas a una circular.

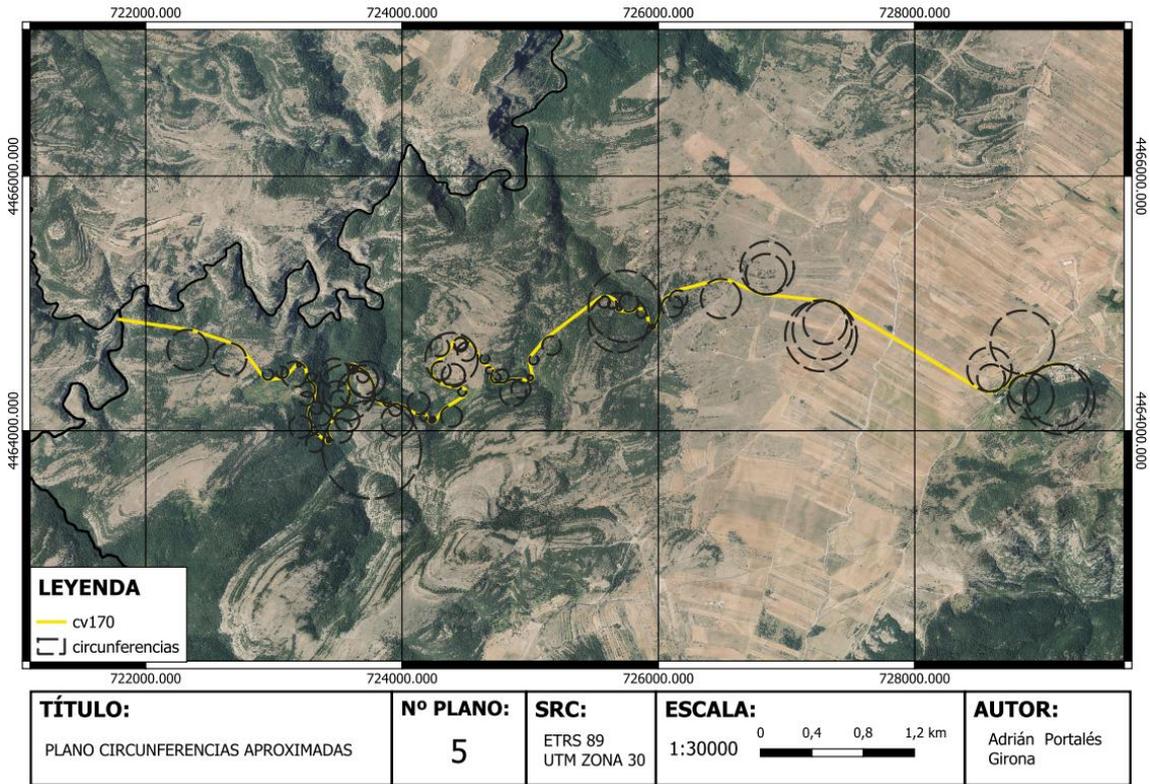


Figura 15. Plano de las circunferencias aproximadas en la vía CV170

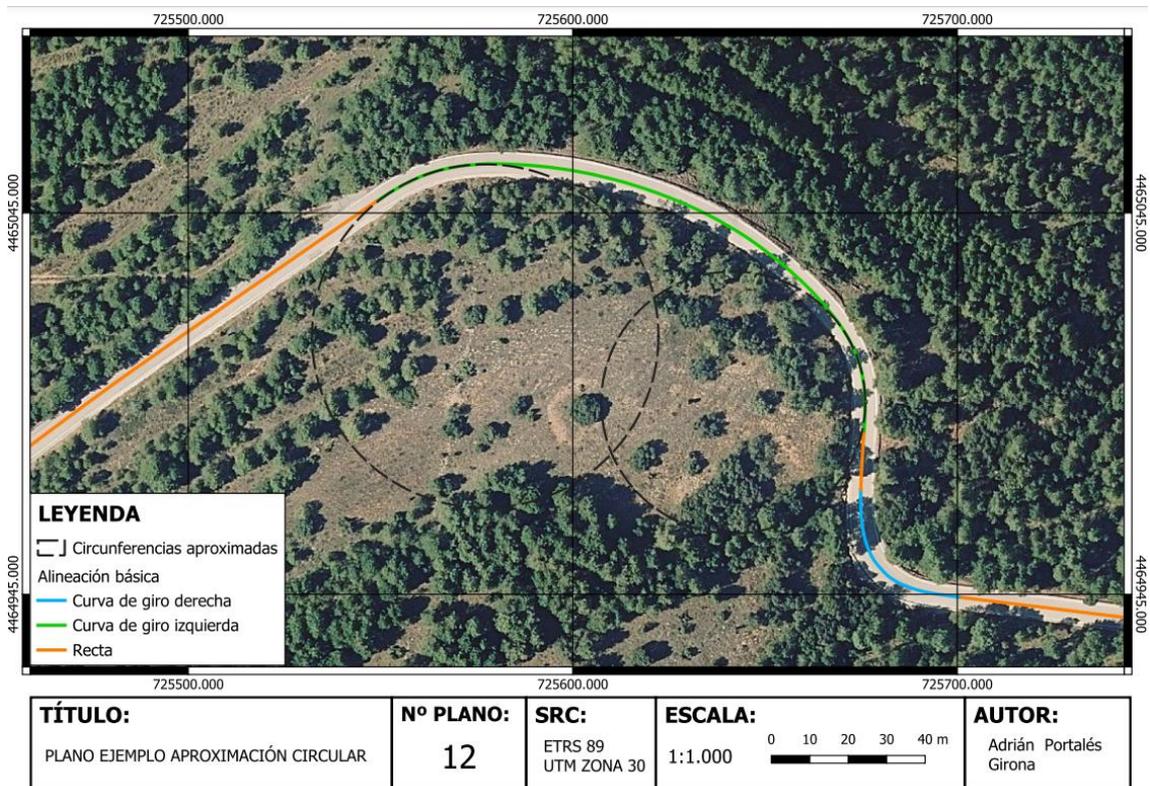


Figura 16. Plano de las circunferencias aproximadas en la curva ID=52

Una vez conseguidas las circulares aproximadas se procede a filtrar las circulares para cortar y limpiar solo las secciones de la circular que se empleen en el eje (Figura 17). Para ello en primer lugar se buscan los puntos de corte con el eje, se realiza un estudio de error respecto al eje original para filtrar los segmentos que ofrecen mayor error y de esta forma poder determinar el desarrollo de la curva circular final (Figuras 18 y 19).

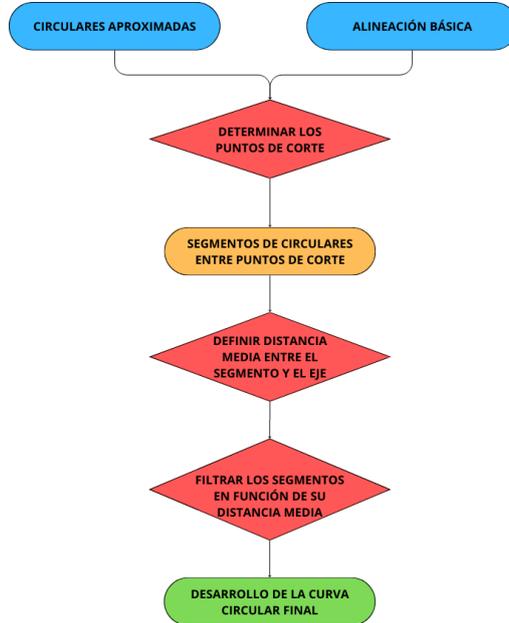


Figura 17. Diagrama de flujo del filtrado y definición de las curvas circulares

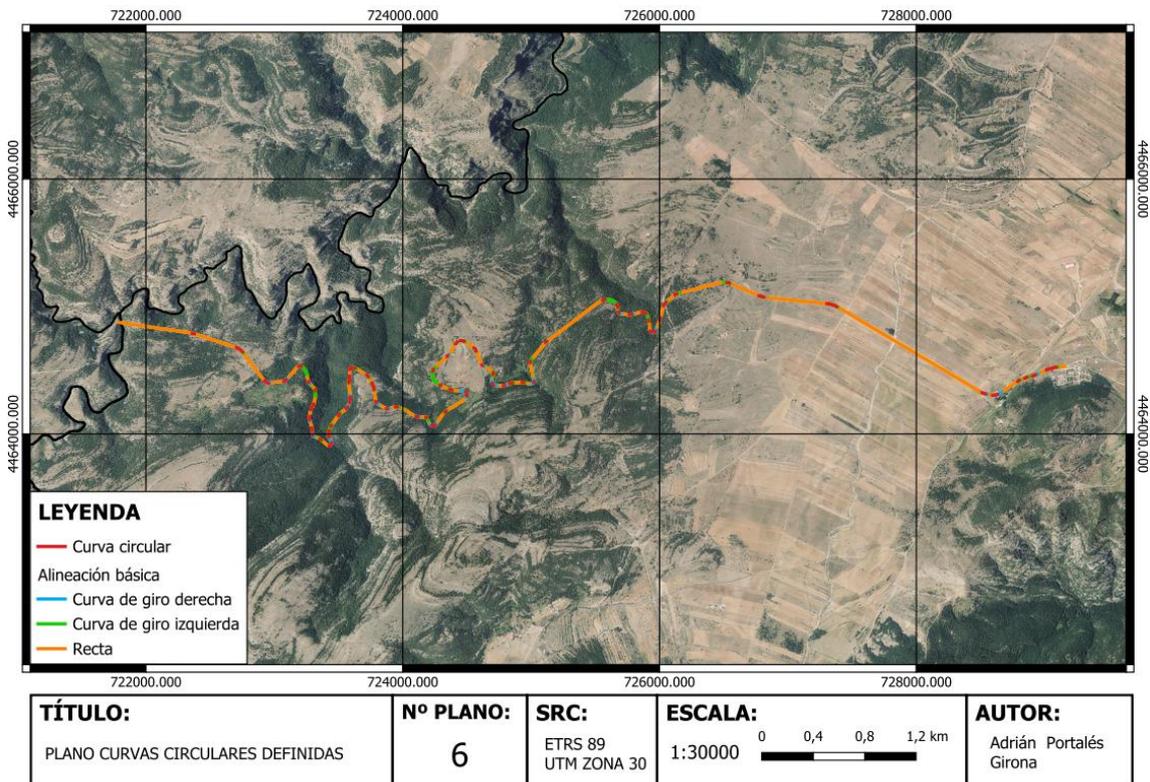


Figura 18. Plano de las curvas circulares definidas en la vía CV170

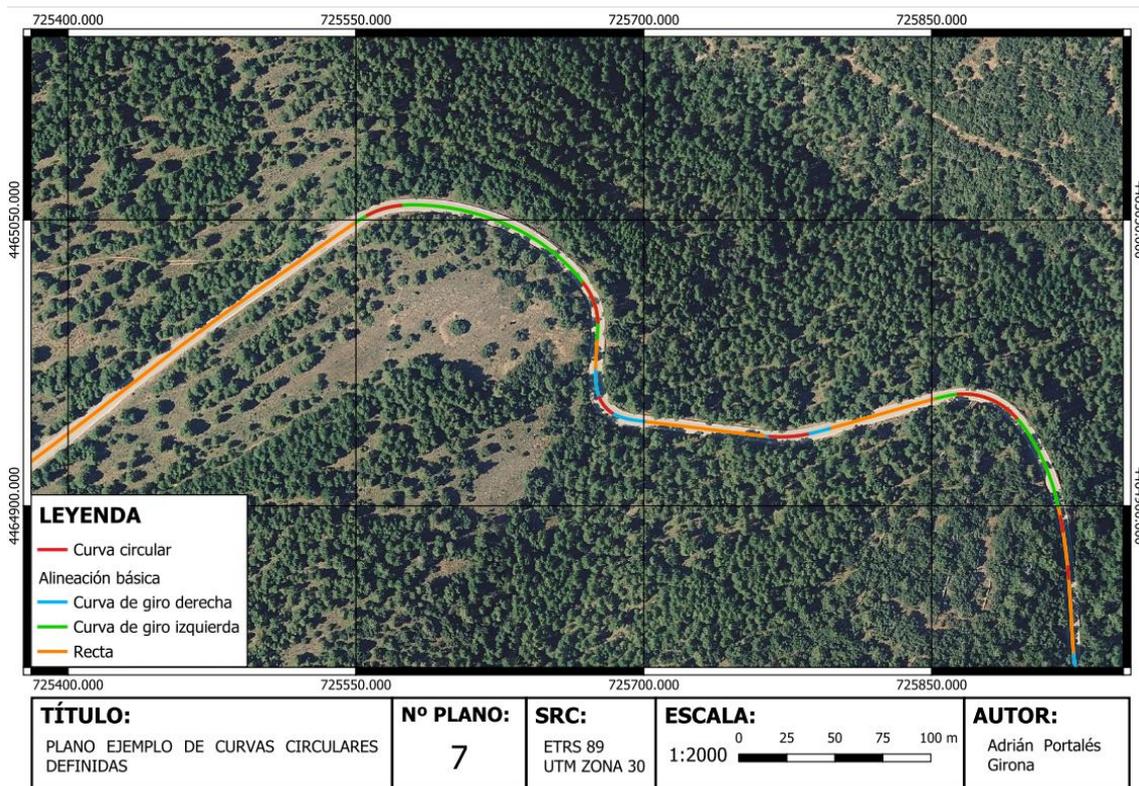


Figura 19. Plano de ejemplo de las curvas circulares definidas en la vía CV170

Por otro lado, en los elementos que por falta de puntos para realizar un MMCC no se haya podido calcular una circular, se define una curva circular tangente a los elementos rectos anterior y posterior. Se opta por esta opción porque estos casos se deben a desarrollos pequeños que no tiene información y con esta solución se consigue un resultado satisfactorio.

En tercer lugar, una vez definidas las circulares primarias y los elementos rectos teóricos se debe de calcular y desarrollar los elementos de transición. En este proyecto se ha optado por dos tipos de elementos de transición, clotoides y circulares, se emplearán clotoides para la unión de elementos rectos y curvas circulares, mientras que las circulares se emplearán para unir dos curvas circulares diferentes y en los casos en los que no se haya podido definir una clotoide que una un elemento recto y una curva circular, se puede observar mejor lo anteriormente mencionado en el diagrama de flujo de la figura 20.

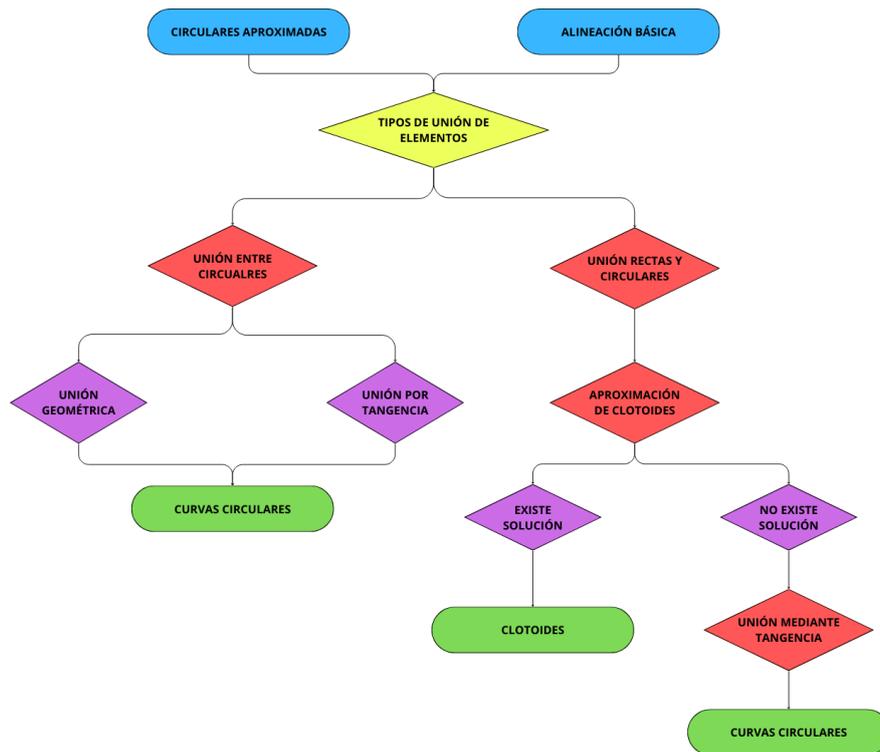


Figura 20. Diagrama de flujo de los elementos de transición

En lo que respecta a las curvas de transición se empieza definiendo las curvas de transición entre curvas circulares la cual se puede definir de dos formas diferentes. Por un lado, lo que se denominará unión geométrica dado que se emplea un método basado en propiedades geométricas que se define en dibujo técnico.

Este proceso se basa en aislar los puntos del eje que se encuentran entre ambas curvas circulares y mediante una aproximación mediante MMCC empleando dichos puntos para definir el radio aproximado que tendrá la circular de unión. Una vez obtenido el radio, se realiza una resta de los radios de ambas circulares respecto a este, con lo cual se obtienen una distancia diferente en cada centro que corresponde con el radio de unas circulares auxiliares con las que se definirá el centro de la circular de unión.

Con este fin, se buscan los 2 puntos de intersección que existirán si las circulares auxiliares intersecan y se evalúa cual de los dos es el punto que se empleará como centro de la circular de unión. Teniendo definida la circunferencia de unión mediante su centro y radio, se busca los puntos donde conecta con las circunferencias teóricas de ambas curvas circulares, en dichos puntos de contacto serán tangentes las curvas circulares (Figura 21).

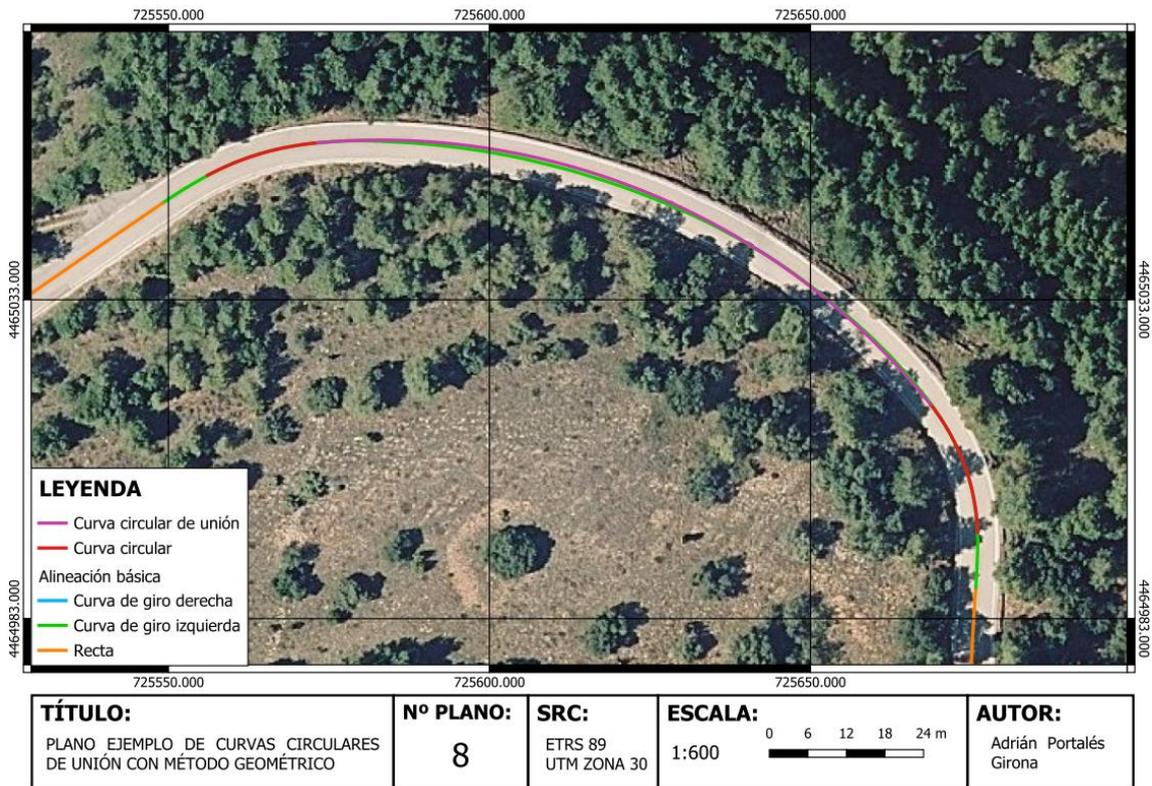


Figura 21. Plano de la circular de unión definida en la curva ID=52

Por otro lado, si no es posible realizar el proceso anterior por limitaciones geométricas se emplea un método que se basa en buscar los puntos de las curvas circulares con los cuales se pueda definir unas tangentes a dichos puntos y se pueda definir una circular mediante el método de la cuerda.

Este método es un proceso iterativo por el cual, en función de unas normas establecidas en función del sentido de giro, se utiliza el punto final de la primera circular para definir la recta tangente en dicho punto y el punto inicial de la segunda circular para definir la recta tangente en dicho punto. En caso de que no cumpla dichas normas establecidas para evitar casos imposibles de resolver, se retrocede un punto en la primera circular y se avanza uno en la segunda circular, este proceso se repite hasta encontrar un caso viable.

Tras elegir un par de puntos válido, utilizando los valores de azimuth de ambas rectas tangentes se define la recta bisectriz entre ambas tangentes, calculada la bisectriz se define el punto de intersección entre la bisectriz y la alineación desde el centro y el punto de tangencia empleado de la curva circular con el menor radio de ambas circulares. Dicho punto se considera el centro de la curva circular de transición calculada y como radio la distancia entre dicho centro y el punto de tangencia de la circular con menor radio.

De esta forma se tiene una circular que será tangente al punto anteriormente mencionado y con la otra circular se unirá mediante una recta que siga el azimuth de la tangente definida. Se muestra un ejemplo de ello en la figura 22, en ella se observa en rojo las circulares iniciales, en morado la circular de transición definida y en negro la recta tangente empleada para unir la circular de transición y la otra curva circular.

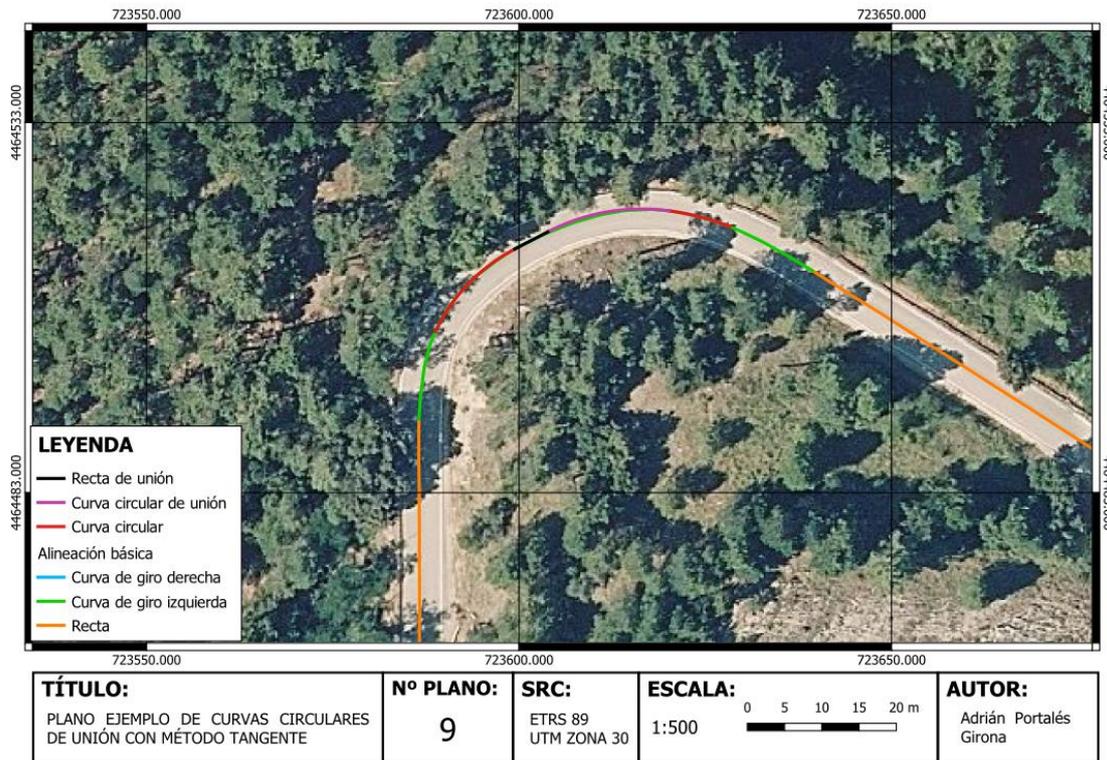


Figura 22. Plano de ejemplo de unión de circulares mediante el método tangente

Tras definir las uniones entre circulares se definen las curvas de transición entre rectas y curvas circulares, en primer lugar se busca desarrollar una clotoide que una ambos elementos con esta premisa se sigue un esquema como el que se muestra en el diagrama de flujo de la figura 23.

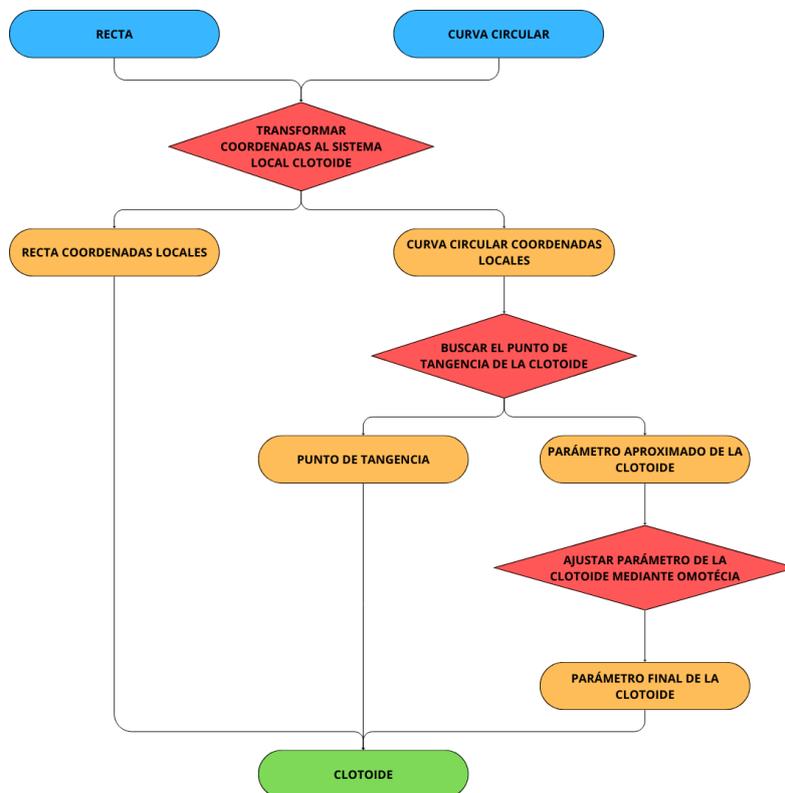


Figura 23. Diagrama de flujo para la definición de las clotoides

Como se observa en el esquema anterior en primer lugar se necesita transformar las coordenadas de los elementos a un sistema local de la clotoide en el cual se utiliza como origen el punto final de la recta. La dirección del eje X lo marca la dirección de la recta y el sentido positivo en el sentido de avance de la recta si es una clotoide de entrada o en sentido contrario si es una clotoide de salida, y la dirección Y es la perpendicular del eje X con sentido positivo hacia el interior de la curva.

Una vez conseguidas las nuevas coordenadas locales, tal y como se define en el artículo **(Blanch, Checa, Marín 2013)** se obtiene el ángulo de entrada de la clotoide o ángulo Tau al conseguir el ángulo que forma la perpendicular del centro al eje X respecto a la línea que forma el centro con el punto de tangencia elegido. Para averiguar cuál es dicho punto de tangencia o aquel que se acerca más a dicho punto se realiza el cálculo del ángulo Tau para cada punto y calcular su coordenada Y a través de una ecuación que difiere respecto a la general mostrada anteriormente, dado que al considerarse puntos de tangencia se puede determinar la siguiente igualdad:

$$y = s \left(1 - \frac{\alpha^2}{10} - \frac{\alpha^4}{216} - \frac{\alpha^6}{9360} \right)$$

Ecuación 9. Ecuación Y en desarrollo en serie de Taylor de la clotoide

Quedando la siguiente ecuación, la cual con los datos disponibles en este punto de la metodología se puede resolver:

$$L = 2R\alpha_f$$

Ecuación 10. Ecuación de la longitud de la clotoide en el punto de tangencia

$$y = 2R\alpha_f \left(1 - \frac{\alpha_f^2}{10} - \frac{\alpha_f^4}{216} - \frac{\alpha_f^6}{9360} \right)$$

Ecuación 11. Ecuación Y en desarrollo en serie de Taylor en el punto de tangencia de la clotoide

Con el valor de Y calculado en cada punto se compara con su valor de Y real actual, el punto que muestre la menor diferencia se considera el punto de tangencia a utilizar para la definición de la clotoide final. Como siempre existirá una diferencia entre ambas, lo que crearía problemas de conexión entre elementos, se recalcula el valor de A de la clotoide empleando la propiedad de homotecia de las clotoides siguiente:

$$y_n = \frac{A_n}{A_i} y_i$$

Ecuación 12. Ecuación de la homotecia de la clotoide en la coordenada Y

Tras realizar la homotecia se consigue el verdadero valor del parámetro de la clotoide (A) y se mantiene el valor de la longitud de la clotoide (L) de la primera aproximación, lo que devuelve una clotoide tangente al punto de tangencia. Para finalizar la determinación de las clotoides, se realiza un filtrado de las mismas para evitar superposiciones entre clotoides de entrada y salida, que las clotoides tengan su inicio entro el punto inicial de la recta y el punto de inicio de la curva para evitar casos sin sentido (Figura 24).

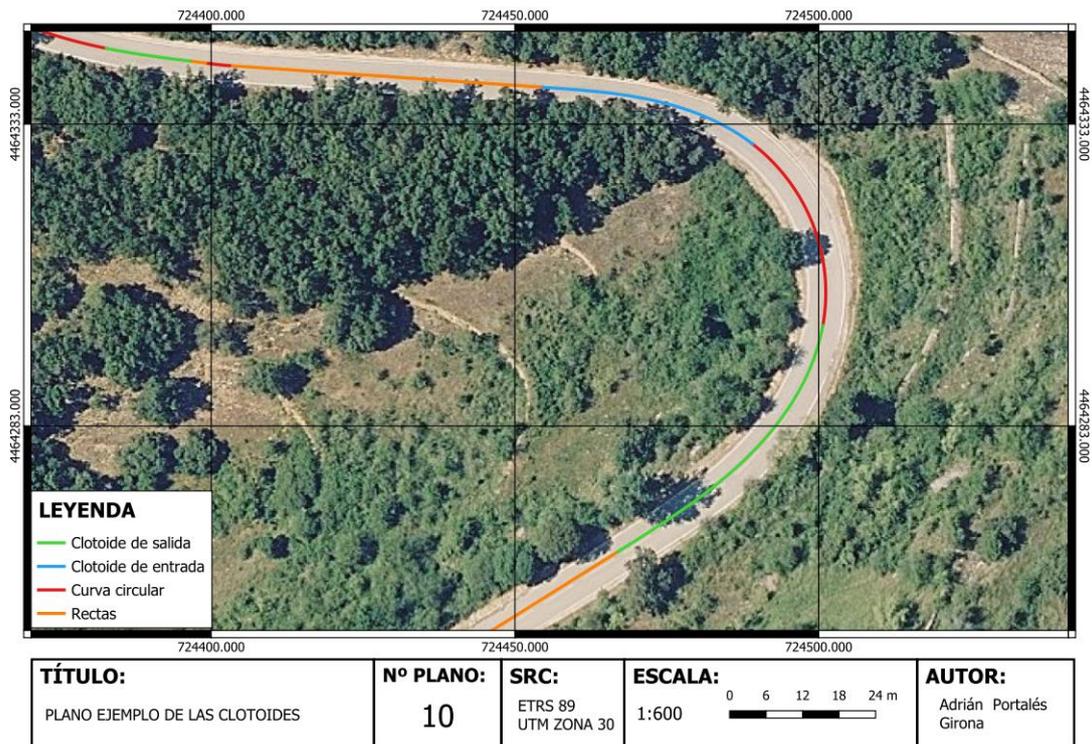


Figura 24. Plano de ejemplo de las clotoides definidas

Por último, tras los filtrados realizados solo quedarán casos de conexión entre rectas y circulares, que como se ha indicado en el diagrama de flujo de la figura 20 se calculará una conexión entre ellos mediante una curva circular tangente, siguiendo la misma metodología que para los casos de unión de circulares mediante el método de tangentes (Figura 25).

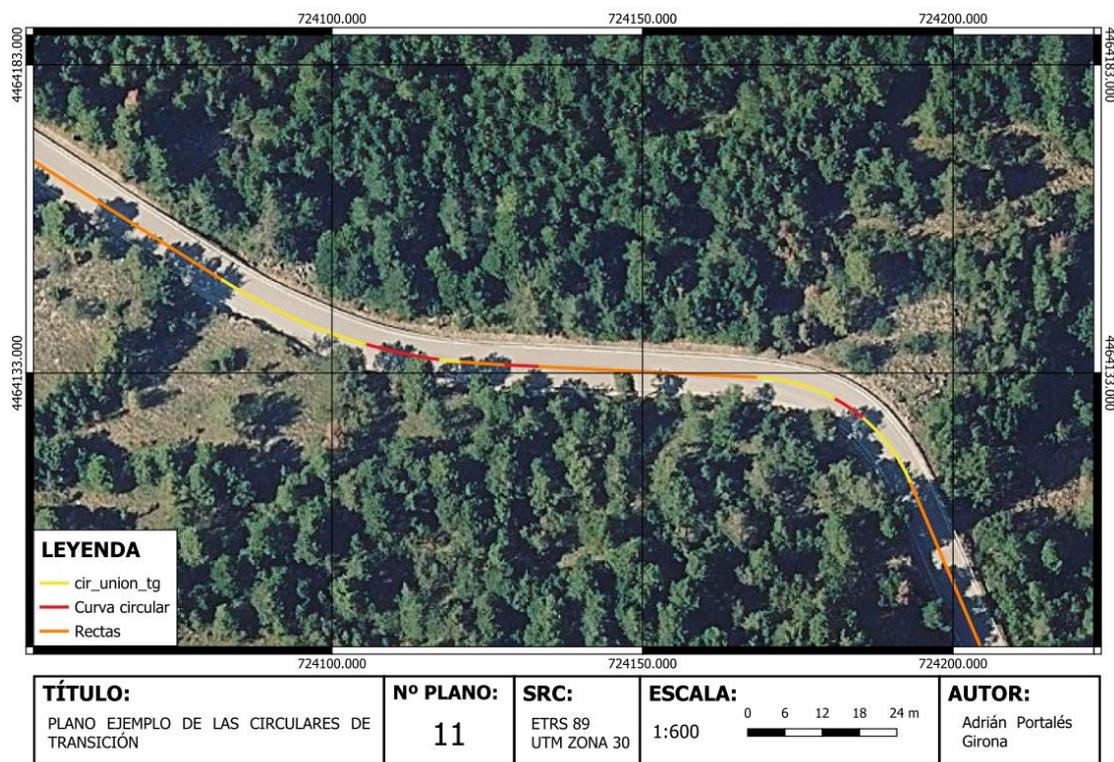


Figura 25. Plano de ejemplo de las curvas circulares de transición definidas

Todo este proceso se ha implementado en un plugin del Sistema de Información Geográfica (SIG) QGIS, desarrollando de esta forma una herramienta automática con una interfaz fácil e intuitiva como se muestra en la figura 26, donde se puede seleccionar el archivo en formato shapefile, introducir los valores umbrales que el usuario considere o por otra parte dejar las opciones en blanco para utilizar valores que se han indicado internamente por defecto tras varias pruebas realizadas:

- **Variación angular máxima:** 1^º
- **Radio mínimo:** 800 m

Y por último un seleccionador del directorio donde se quiera guardar los resultados obtenidos.

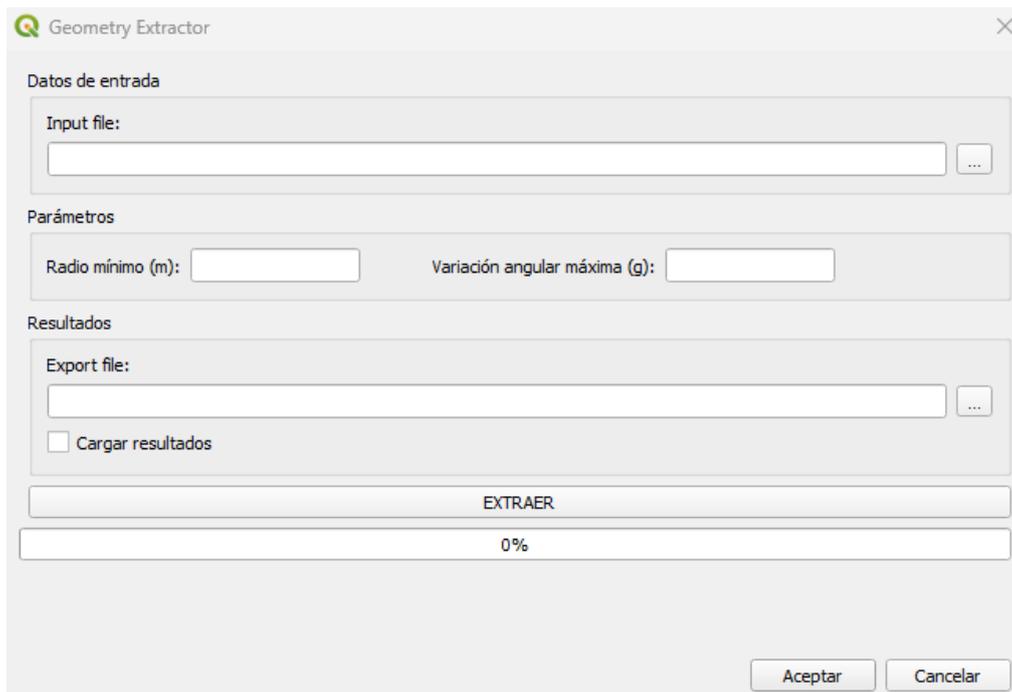


Figura 26. Interfaz de la herramienta desarrollada en QGIS

11. RESULTADOS

Como resultado final del proceso explicado anteriormente se obtiene los siguientes archivos en formato GeoJSON:

- **Alineación básica del eje**
- **Rectas teóricas**
- **Curvas circulares primarias**
- **Curvas circulares de transición**
- **Clotoides**
- **Alineación final del eje**

El resultado final buscado por el usuario es la alineación final del eje donde se combinan todos los elementos geométricos teóricos definidos junto a sus características principales que definen su geometría (Figuras 28 y 29). Sin embargo, también se ofrecen los resultados intermedios para posibles usos que pueda dar el usuario en futuros estudios.

La alineación final del eje ofrece los siguientes campos de información en cada registro (Figura 27), algunos campos tendrán valor en todos los registros y otros solo en los elementos a los que corresponda:

- **ID:** identificador único de cada geometría.
- **ID_curv:** identificador que enlaza la geometría con el registro en el que se engloba en la alineación básica del eje.
- **Elemento:** define que tipo de geometría representa (Recta, Circular, Clotoide).
- **Longitud:** extensión en metros de la geometría.
- **Azimuth:** valor angular de la orientación de la recta
- **Radio:** valor en metros del radio
- **A:** valor del parámetro de las clotoides
- **Geometría:** valor de la geometría del registro, este campo no se observa en Qgis

ID	ID_curv	Elemento	Longitud	Azimuth	Radio	A
17	9	Recta	29,08710368227...	272,9700349432...	NULL	NULL
18	10	Clotoide	8,598197166162...	NULL	114,7806090705...	31,41506497909...
19	10	Circular	21,48264480804...	NULL	116,4081962868...	NULL
20	10	Clotoide	11,48226640980...	NULL	117,5751219147...	36,74273905128...

Figura 27. Tabla de atributos de ejemplo del resultado

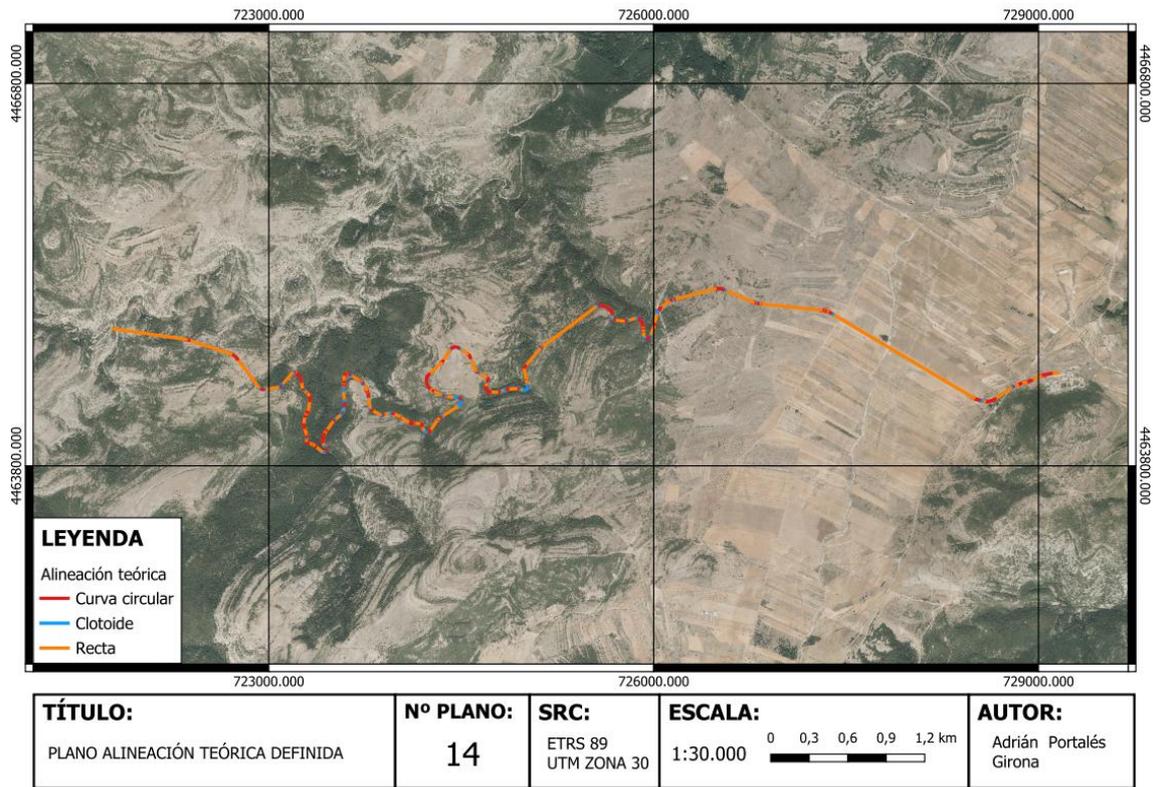


Figura 28. Plano de la alineación teórico definida

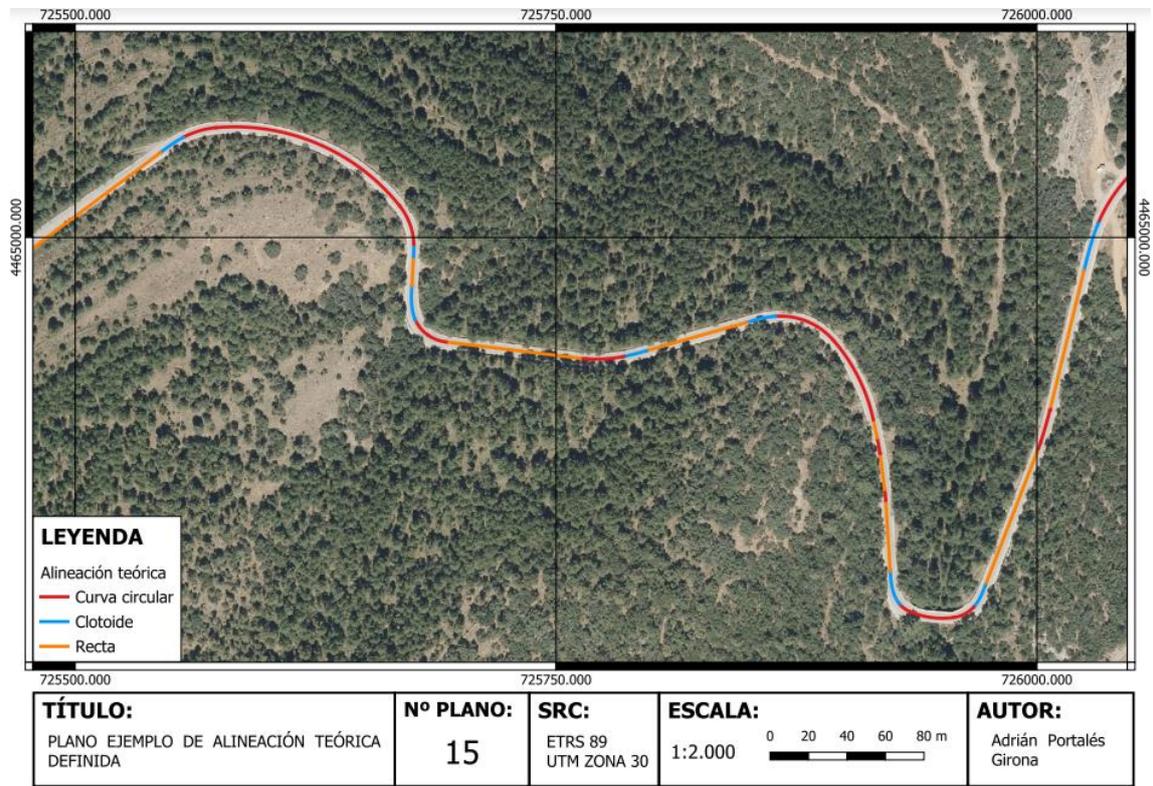


Figura 29. Ejemplo de la alineación teórico definida

Con el fin de determinar si se ha conseguido un resultado satisfactorio se ha creado una serie de puntos a lo largo del eje teórico obtenido, asegurando que exista un punto cada 1 m como mínimo. Cada punto tendrá asignado un identificador que indique a que elemento del eje pertenece, el tipo de geometría que representa dicho elemento y la distancia más corta al eje original, esta distancia sería la discrepancia o error entre el eje teórico y el eje de estudio.

Utilizando dicha información se estudia los errores de cada tipo de geometría, filtrando los puntos que corresponden a cada una, obteniendo las siguientes estadísticas de los valores de distancia/error:

Elementos	Error medio(m)	Desv. Estándar(m)
Rectas	0.264	0.419
Circular	0.182	0.433
Clotoides	0.094	0.133

Tabla 1. Estadísticos básicos del error por tipo de geometría del eje teórico

Además, estas agrupaciones de datos se han representado mediante el gráfico de caja y bigotes de la figura 30, existe a priori errores de hasta más de 3 m en el caso de las rectas, casi 3 m en el caso de las circulares y de casi 1 m en el caso de las clotoides, esto podría inducir a pensar que el resultado ha sido bastante malo. Sin embargo, todos estos valores que aparecen representados con círculos negros se consideran como valores atípicos en este tipo de gráficos, lo que indica que no es la tendencia real del resultado sino casos aislados.

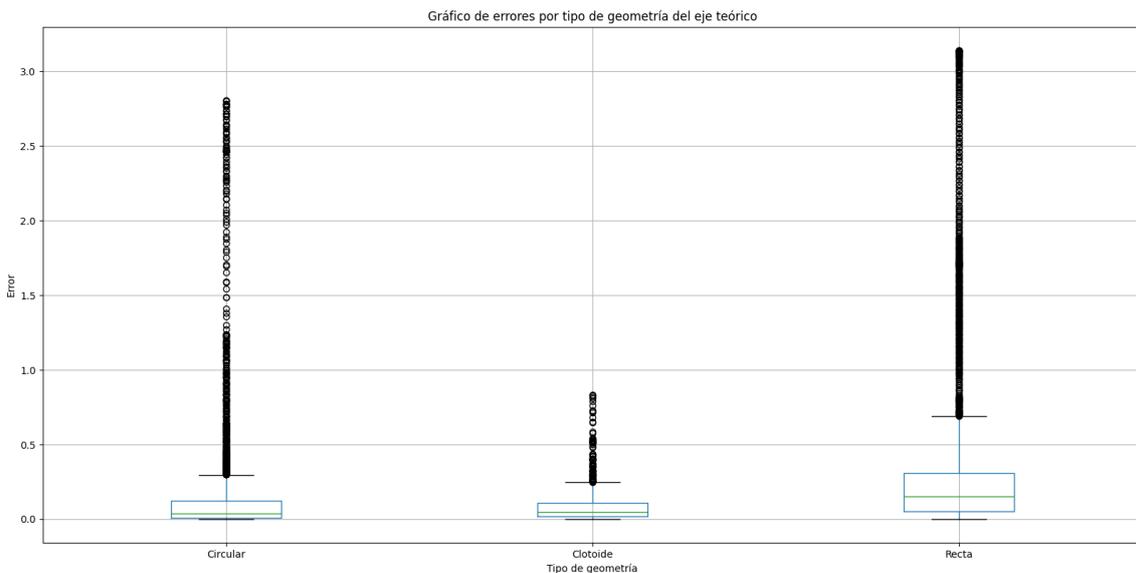


Figura 30. Gráfico de caja y bigotes de los errores de los tipos de geometría



Figura 31. Captura de los elementos considerados errores groseros

En la figura 31 se muestran los elementos detectados con valores atípicos, en naranja se representan las rectas (4 elementos) (Figura 32), en rojo las curvas circulares (20 elementos) (Figura 33) y en azul las clotoides (6 elementos) (Figura 34). A continuación, se muestran unas figuras donde se observa las diferencias de algunos de los elementos a los que pertenecen dichos puntos respecto al eje original:

- **Rectas:**

- ID = 101



Figura 32. Elemento recto clasificado como error grosero

- **Circulares:**

- ID = 158



Figura 33. Elemento circular clasificado como error grosero

- **Clotoides:**
 - ID = 116



Figura 34. Elemento clotoide clasificado como error grosero

En el caso de que se eliminasen dichos elementos detectados como atípicos, el resultado mejora obteniendo los siguientes estadísticos:

Elementos	Error medio(m)	Desv. Estándar(m)
Rectas	0.174	0.144
Circular	0.040	0.047
Clotoides	0.047	0.043

Tabla 2. Estadísticos básicos del error por tipo de geometría del eje teórico filtrado

Esta mejoría se plasma en el gráfico de caja y bigotes de la figura 35 donde se muestran unos errores mucho más reducidos donde la tendencia entre los tipos de geometría siguen siendo la misma, además en las rectas la longitud de la caja y el bigote superior indican una gran variabilidad en los valores de los errores, lo que contrasta con el tamaño de la caja y los bigotes de las circulares y las clotoides que son más simétricos y de menor tamaño, lo que indica una agrupación de los errores más marcada.

Es decir, las rectas son los elementos que más difieren respecto al eje original, en segundo lugar las circulares y por último las clotoides. Puede sorprender que el elemento más sencillo geoméricamente hablando sea el tipo de geometría que más difiere respecto al original. Sin embargo, como se ha indicado anteriormente los cambios angulares de los datos de los puntos eran muy abruptos, lo que obligaba a dar un umbral más permisivo en la determinación de rectas, perdiendo en el proceso la detección de las curvas más suaves e implicando una mayor diferencia de las geometrías rectas respecto al eje.

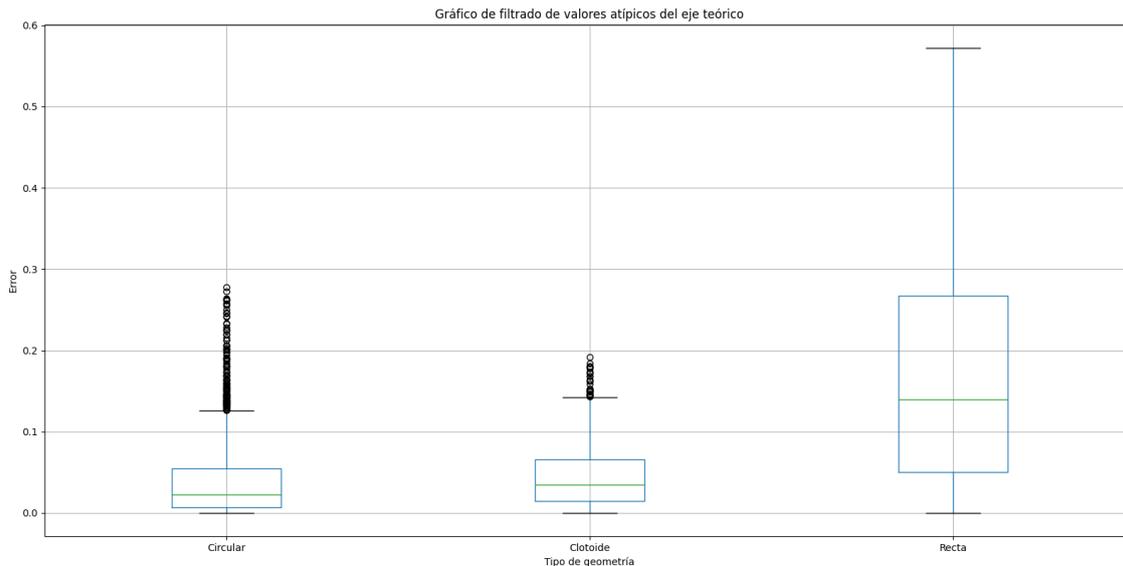


Figura 35. Gráfico de caja y bigotes de los errores por tipo de geometría tras filtrar los valores atípicos

Por otro lado, cabe destacar que las clotoides y las circulares que se han calculado como unión de elementos (Circular - Circular o Recta – Circular) son geometrías cuya definición es dependiente de las rectas y curvas circulares primarias definidas anteriormente, esto provoca que su exactitud y precisión derive de dichos elementos básicos. Esta consecuencia se puede observar fácilmente en el eje, siendo los casos más evidentes las circulares de transición que conforman 19 de las 20 circulares que se han filtrado anteriormente.

A pesar de lo comentado anteriormente, realizar un filtrado de geometrías en sí no tiene sentido para el resultado final que se busca con esta metodología, una aproximación teórica continua de un eje de una vía de comunicación. No es coherente la obtención de un eje teórico inconexo en alguno de sus elementos o con elementos faltantes, por lo tanto esta metodología muestra unos resultados bastante aceptables en la mayoría de sus casos, lo que ya es un gran avance en lo que se refiere al ahorro de tiempo teniendo que reajustar solamente unos pocos elementos en vez de todo el eje.

No obstante, en este trabajo de final de master se pretendía buscar una metodología que pudiese sustituir al procedimiento estándar más seguido actualmente en Civil 3D, por consiguiente se debe de realizar una comparación de resultados del mismo eje obtenido de dicha forma. En la figura 36 se muestra un plano que muestra el eje teórico conseguido en Civil 3D, a simple vista se observa que en comparación del eje definido con la metodología desarrollada en este trabajo en Civil 3D se definen más circulares y elementos rectos más cortos.

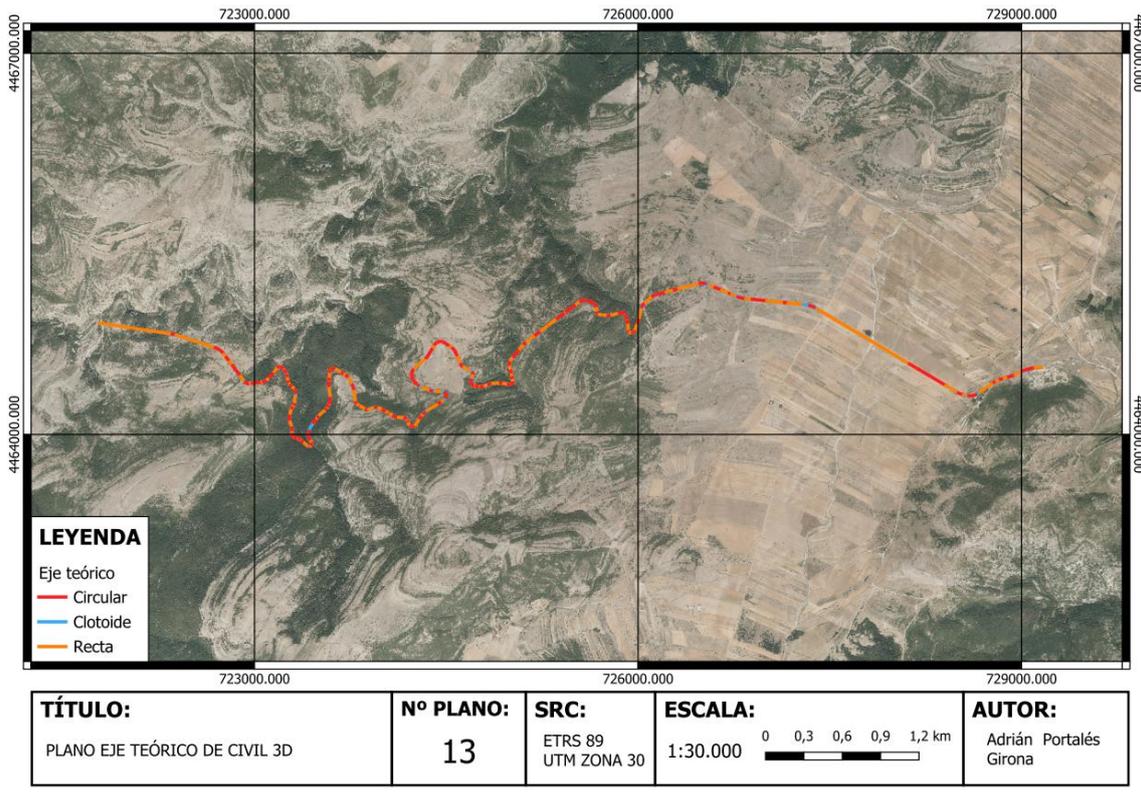


Figura 36. Plano del eje teórico definido mediante Civil 3D

Además, como en el otro eje, se evalúa mediante un punto cada 1 m como mínimo estudiando la distancia de discrepancia respecto al eje original. Copiando el análisis realizado anteriormente se obtienen los siguientes estadísticos y gráfico de caja y bigotes:

Elementos	Error medio(m)	Desv. Estándar(m)
Rectas	0.097	0.131
Circular	0.119	0.135
Clotoides	0.075	0.064

Tabla 3. Estadísticos básicos del error por tipo de geometría del eje obtenido de Civil 3D

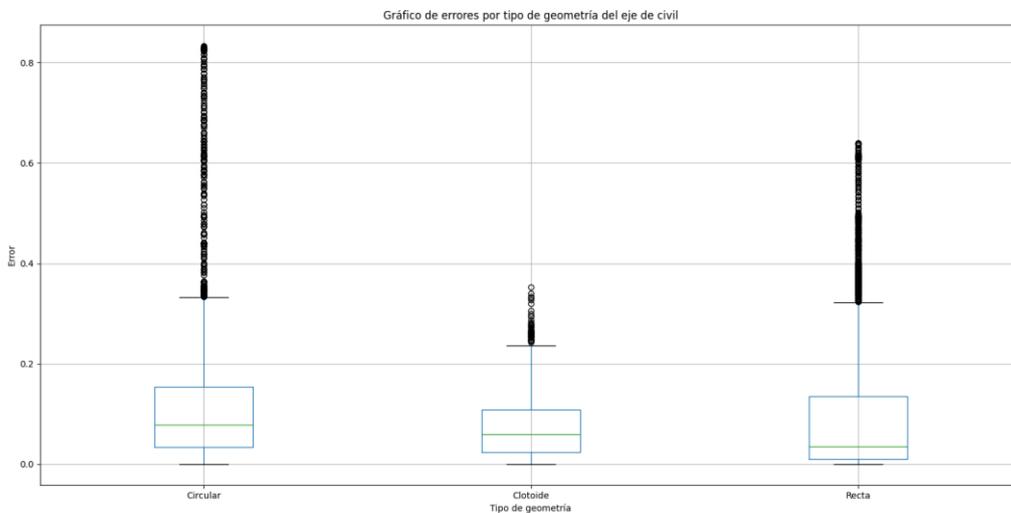


Figura 37. Gráfico de caja y bigotes de los errores por tipo de geometría del eje definido en Civil 3D

Como se puede observar en los resultados, los errores medios y sus desviaciones asociadas son mejores si se compara con los valores del eje teórico sin filtrar. Es un resultado esperable, dado que el eje teórico se obtiene de forma totalmente automática en unos segundos, mientras que el eje de civil es resultado de un proceso iterativo del técnico que busca un ajuste óptimo.

También se puede observar en el gráfico de la figura 37 que al contrario que en el eje teórico la geometría que peor se ajusta al eje son las curvas circulares. Además, se muestra que la tendencia en todas las geometrías se concentra entre el rango $[0, 0.2]$, las cajas de la clotoide y de la recta son más pequeñas y uniendo esto con las diferencias de valores atípicos entre elementos se puede afirmar que las curvas circulares presentan errores más extremos y tienen una mayor variabilidad en sus valores que en los otros tipos de geometría.

Por último, cabe destacar que actualmente se está trabajando en una mejora de esta herramienta para evitar estos elementos que se consideran errores groseros que en gran medida se producen en la definición de los diferentes elementos de transición, los cuales dependen directamente de la calidad de las aproximaciones y definiciones de las rectas y las curvas circulares primarias.

Esta mejora se basa en dar la opción al usuario para en vez de aplicar todo el proceso entero se pueda aplicar solo el proceso hasta haber conseguido las rectas y las curvas circulares primarias, con el fin de poder modificar estos elementos por el usuario y con ello reintroducirlos en la herramienta donde exista la opción de ofreciendo los elementos rectos y circulares se calculen las curvas de transición correspondientes. De esta forma se podría evitar en gran medida los errores que se producen, pudiendo obtener así unos errores más parecidos a los mostrados tras el filtrado y de esta forma obtener un resultado más cercano al definido mediante Civil 3D.

12. PRESUPUESTO

Para el presupuesto, en relación con los recursos humanos del trabajo se parte del convenio de ingenieros y oficina técnica más actual, que corresponde con el año 2020 publicado en el BOE. En la figura 38 se muestran los diferentes niveles de los trabajadores según el convenio mencionado.

Niveles	Tabla salarial según art. 33		Plus convenio anual según art. 38 convenio	Total anual	
	Mes x 14	Anual			
1	LICENCIADOS Y TITULADOS 2.º Y 3.º CICLO UNIVERSITARIO Y ANALISTA	1.712,42	23.973,88	2.349,69	26.323,57
2	DIPLOMADOS Y TITULADOS 1.º CICLO UNIVERSITARIO. JEFE SUPERIOR	1.291,04	18.074,56	2.349,69	20.424,25
3	TÉCNICO DE CÁLCULO O DISEÑO, JEFE DE 1.º Y PROGRAMADOR DE ORDENADOR	1.244,93	17.429,02	2.349,69	19.778,71
4	DELINEANTE-PROYECTISTA, JEFE DE 2.º Y PROGRAMADOR DE MAQ. AUXILIARES	1.141,36	15.979,04	2.349,69	18.328,73
5	DELINEANTE, TÉCNICO DE 1.º, OFICIAL 1.º ADMTVO. Y OPERADOR DE ORDENADOR	1.019,82	14.277,48	2.349,69	16.627,17
6	DIBUJANTE, TÉCNICO DE 2.º, OFICIAL 2.º ADMTVO., PERFORISTA, GRABADOR Y CONSERJE	878,63	12.300,82	2.349,69	14.650,51
7	TELEFONISTA-RECEPCIONISTA, OFICIAL 1.º OFICIOS VARIOS Y VIGILANTE	849,16	11.888,24	2.349,69	14.237,93
8	AUXILIAR TÉCNICO, AUX. ADMTVO., TELEFONISTA, ORDENANZA, PERSONAL DE LIMPIEZA Y OFICIAL 2.º OFICIOS VARIOS	790,36	11.065,04	2.349,69	13.414,73
9	AYUDANTE OFICIOS VARIOS	757,29	10.602,06	2.349,69	12.951,75

Figura 38. Tabla de niveles de los trabajadores según convenio de ingenieros y oficinas técnicas

En este trabajo solo se ha empleado un trabajador con de nivel 1 (Titulado de 2º ciclo), este proyecto inicio en febrero de 2024 y la metodología comentada se terminó de desarrollar en septiembre de 2024. Es decir, se ha estado desarrollando durante 7 meses, en el cual como material necesario en el proceso se tiene “Python” y “QGIS”.

Trabajadores	Salario mensual	Salario anual	Plus convenio	Total anual
Titulado 2º ciclo universitario	1,712.42€	23,973.88€	2,349.69€	26,323.57€

Tabla 4. Remuneración de los trabajadores por el convenio de ingenieros y oficina técnica

Trabajadores	Seguridad social	Coste total	Coste diario
Titulado 2º ciclo universitario	8,164.52 €	34,488.09€	136.27€

Tabla 5. Coste den los trabajadores por el convenio de ingenieros y oficina técnica para la empresa

Material	Licencia	Coste
QGIS	Libre	0€
PYTHON	Libre	0€

Tabla 6. Costes de los materiales empleados en el proyecto

Tiempo (Meses)	Tiempo (h)	Coste material	Coste RRHH	Coste total
7	1,248	0€	21,242.92 €	21,242.92 €

Tabla 7. Costes totales del proyecto

13. CONCLUSIONES

Durante el desarrollo de este trabajo final de master se pretendía definir una metodología que optimizase el proceso de inventariado geométrico de la planimetría de las vías de comunicación, principalmente las carreteras, tras estudiar diversos proyectos con metodologías muy dispares entre sí, se optó por una metodología híbrida que mezcla el uso de umbrales de detección y aproximaciones mediante MMCC.

Actualmente se emplea un proceso iterativo manual mediante Civil 3D que ofrece errores de varios centímetros o incluso decenas de centímetros respecto al eje original. En lo que al requisito de precisión mínima requerida, no existe un estándar fijado actualmente y simplemente se busca una representación lo más fidedigna posible de su geometría, lo que tras consensuar con mi superior determinamos en alrededor de 20-30 cm respecto al eje a priori. Con esta premisa y viendo los resultados obtenidos, la metodología actual no cumple con estos mínimos si se pretende utilizar sin realizar ningún tipo de corrección posterior. Esto se debe a que existen varios elementos considerados aproximaciones groseras dado que difieren en gran medida del eje original.

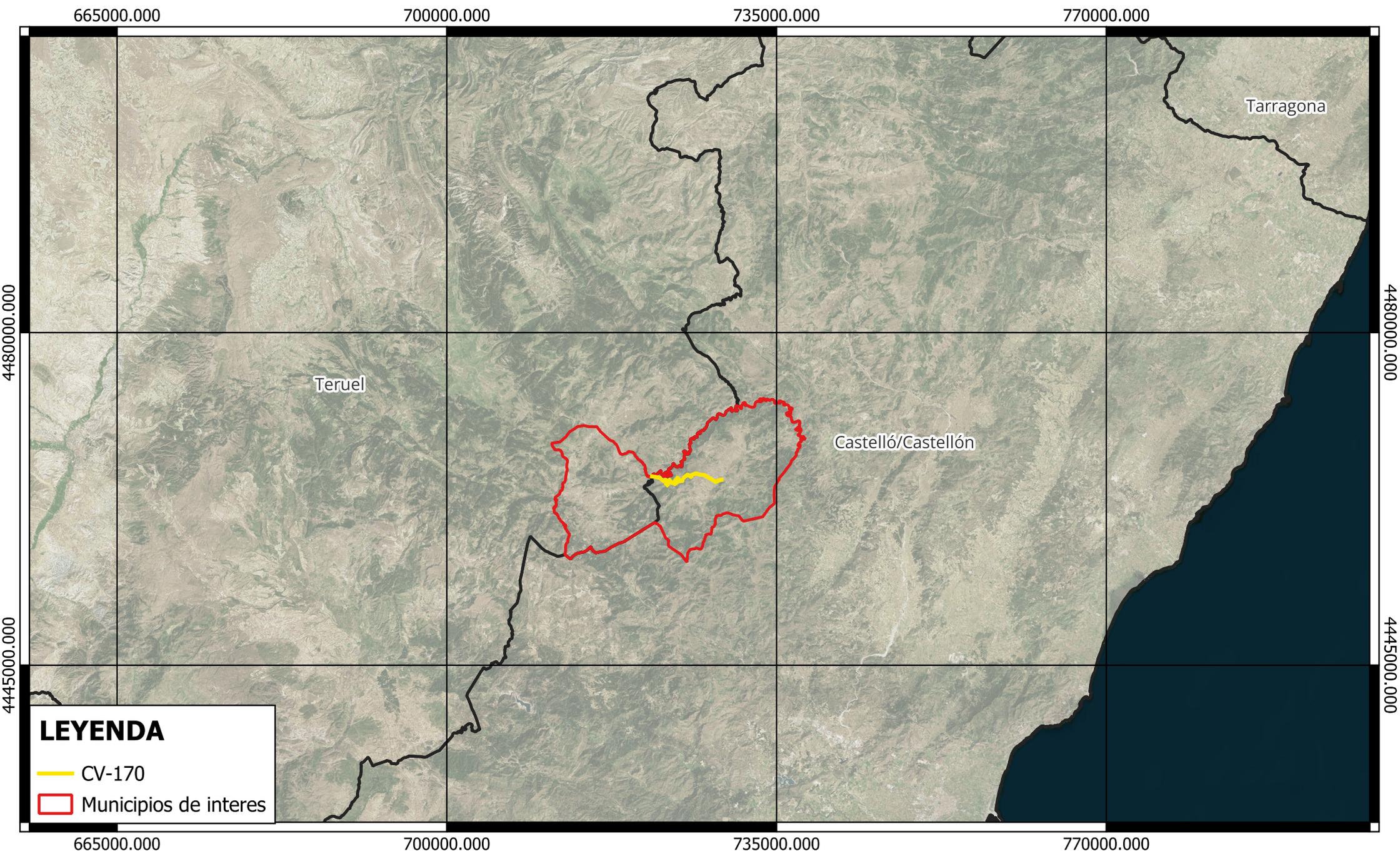
Sin embargo, como se ha comentado en los resultados, si se eliminasen o corrigieran los elementos con un error grosero, se podría obtener un resultado muy parecido al que se consigue mediante el proceso empleado con Civil 3D. Dado que la metodología manual demanda un esfuerzo sustancial en términos de tiempo de trabajo, la metodología desarrollada se puede considerar una alternativa viable si se emplea parte de ese tiempo ahorrado en comparación con el proceso manual para corregir estos errores groseros, consiguiendo un resultado con una precisión parecida en un tiempo más reducido.

En conclusión, la metodología por si sola no ofrece una alternativa total al proceso actualmente utilizado como era la intención en este trabajo, no obstante es una alternativa muy viable si se añaden las correcciones necesarias posteriormente. Además, ya se está desarrollando una solución a este problema como se comentó en los resultados, queriendo implementar la posibilidad de definir los elementos principales en primer lugar, corregir las partes que se crean necesarias y calcular las curvas de transición respecto a estas.

14. BIBLIOGRAFÍA

1. HOLGADO BARCO, Alberto, et al. Automatización en la extracción del trazado y el inventario geométrico de carreteras mediante sistemas de cartografiado móvil. 2016.
2. CANTISANI, Giuseppe; DEL SERRONE, Giulia. Procedure for the identification of existing roads alignment from georeferenced points database. *Infrastructures*, 2020, vol. 6, no 1, p. 2.
3. DI MASCIO, Paola, et al. Procedure to determine the geometry of road alignment using GPS data. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 2012, vol. 53, p. 1202-1215.
4. BARTIN, Bekir, et al. Automatic identification of roadway horizontal alignment information using geographic information system data: CurvS tool. *Transportation research record*, 2022, vol. 2676, no 1, p. 532-543.
5. BLANCH, Luis; CHECA, Emilio; MARÍN, Josefa. Una aproximación a la curva de transición Clotoide vista desde Mathematica. *Modelling in Science Education and Learning*, 2013, vol. 6, p. 105-119.

15. ANEXOS



TÍTULO:

PLANO DE LOCALIZACIÓN

Nº PLANO:

1

SRC:

ETRS 89
UTM ZONA 30

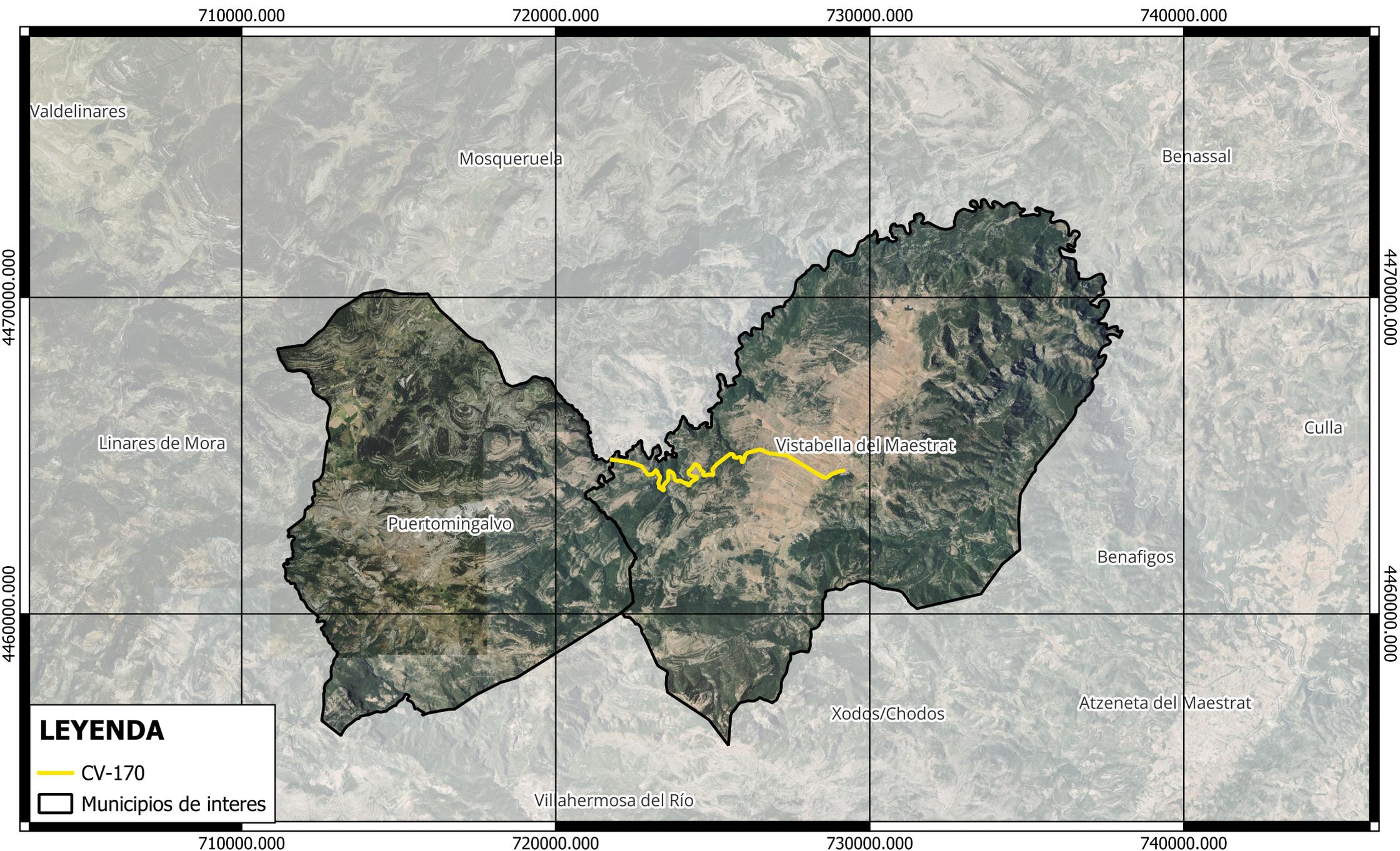
ESCALA:

1:50.000



AUTOR:

Adrián Portalés
Girona



LEYENDA

— CV-170

▭ Municipios de interes

TÍTULO:

PLANO DE SITUACIÓN

Nº PLANO:

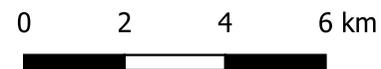
2

SRC:

ETRS 89
UTM ZONA 30

ESCALA:

1:150.000



AUTOR:

Adrián Portalés
Girona

722000.000

724000.000

726000.000

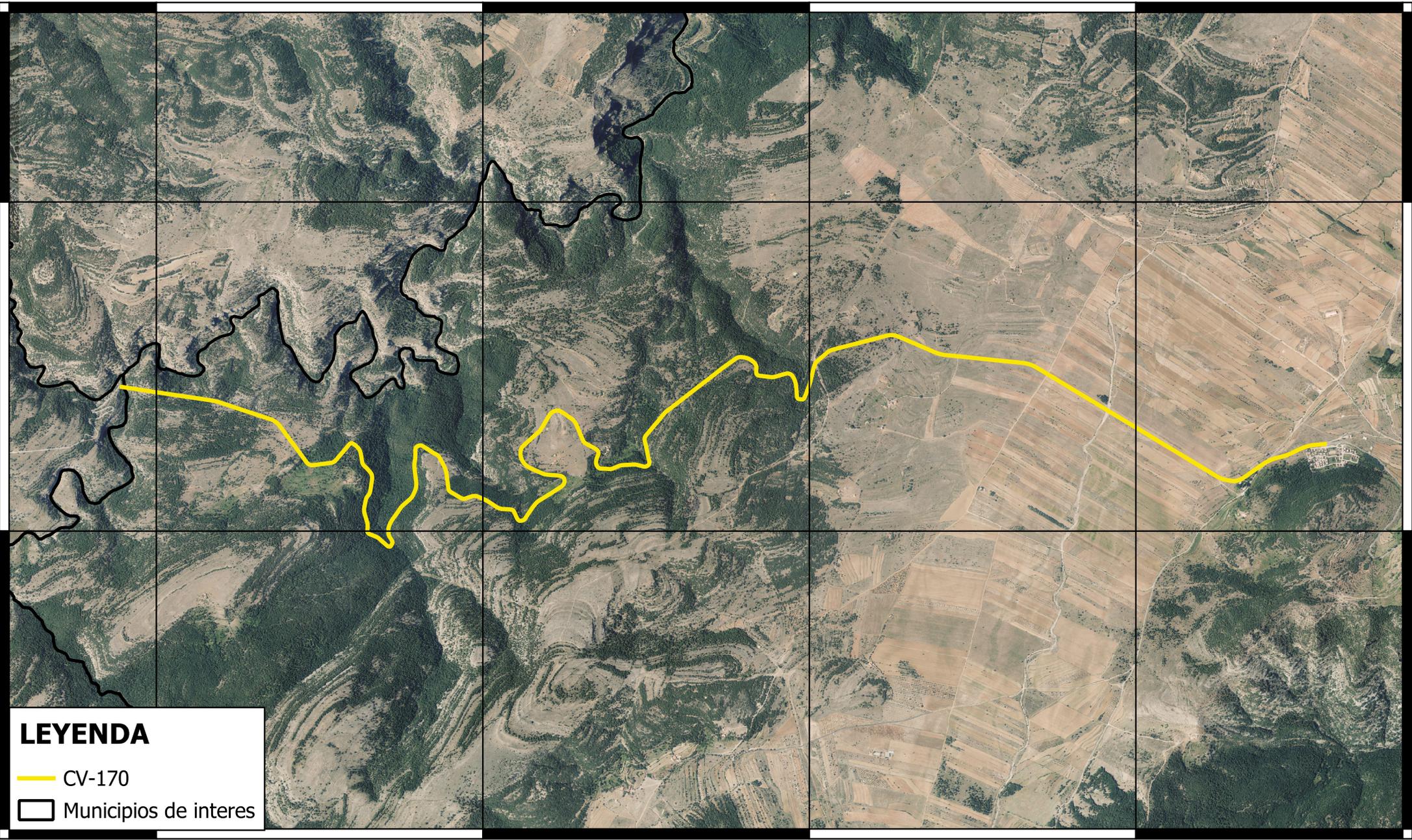
728000.000

4466000.000

4466000.000

4464000.000

4464000.000



LEYENDA

— CV-170

▭ Municipios de interes

722000.000

724000.000

726000.000

728000.000

TÍTULO:

PLANO AMPLIADO DE SITUACIÓN

Nº PLANO:

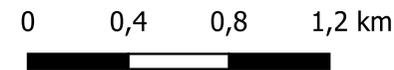
3

SRC:

ETRS 89
UTM ZONA 30

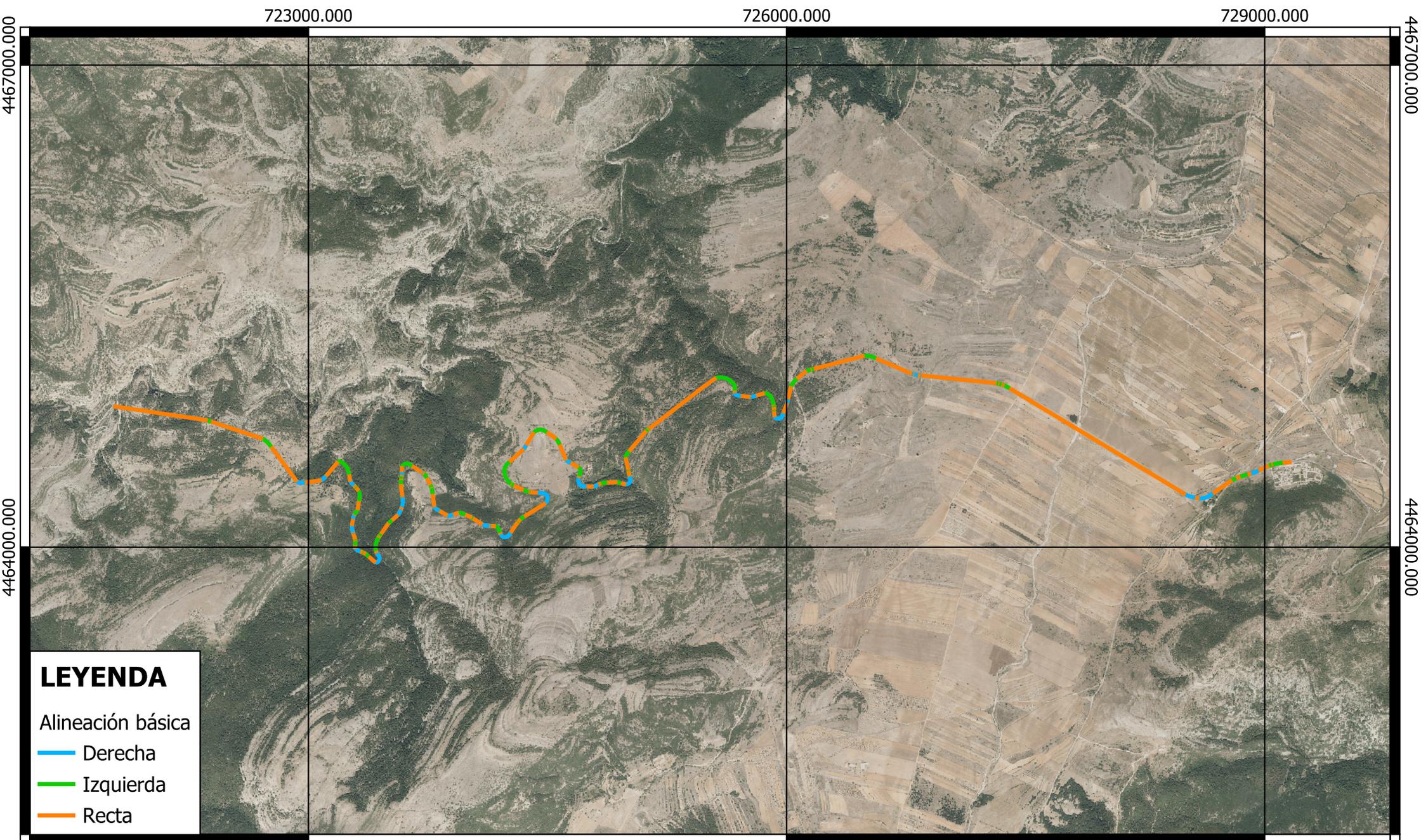
ESCALA:

1:30000



AUTOR:

Adrián Portalés
Girona



LEYENDA

- Alineación básica
- Derecha
- Izquierda
- Recta

TÍTULO:

PLANO ALINEACIÓN BÁSICA

Nº PLANO:

4

SRC:

ETRS 89
UTM ZONA 30

ESCALA:

1:30.000



AUTOR:

Adrián Portalés
Girona

722000.000

724000.000

726000.000

728000.000

4466000.000

4466000.000

4464000.000

4464000.000

LEYENDA

- cv170
- circunferencias

722000.000

724000.000

726000.000

728000.000

TÍTULO:

PLANO CIRCUNFERENCIAS APROXIMADAS

Nº PLANO:

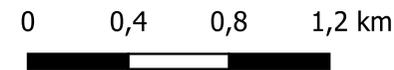
5

SRC:

ETRS 89
UTM ZONA 30

ESCALA:

1:30000



AUTOR:

Adrián Portalés
Girona

722000.000

724000.000

726000.000

728000.000

4466000.000

4466000.000

4464000.000

4464000.000

LEYENDA

- Curva circular
- Alineación básica
- Curva de giro derecha
- Curva de giro izquierda
- Recta

722000.000

724000.000

726000.000

728000.000

TÍTULO:

PLANO CURVAS CIRCULARES DEFINIDAS

Nº PLANO:

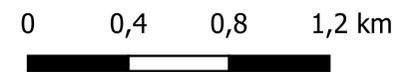
6

SRC:

ETRS 89
UTM ZONA 30

ESCALA:

1:30000



AUTOR:

Adrián Portalés
Girona



LEYENDA

- Curva circular
- Alineación básica
- Curva de giro derecha
- Curva de giro izquierda
- Recta

TÍTULO:

PLANO EJEMPLO DE CURVAS CIRCULARES
DEFINIDAS

Nº PLANO:

7

SRC:

ETRS 89
UTM ZONA 30

ESCALA:

1:2000



AUTOR:

Adrián Portalés
Girona

725550.000

725600.000

725650.000

4465033.000

4465033.000

4464983.000

4464983.000

725550.000

725600.000

725650.000

LEYENDA

- Curva circular de unión
- Curva circular
- Alineación básica
- Curva de giro derecha
- Curva de giro izquierda
- Recta

TÍTULO:

PLANO EJEMPLO DE CURVAS CIRCULARES DE UNIÓN CON MÉTODO GEOMÉTRICO

Nº PLANO:

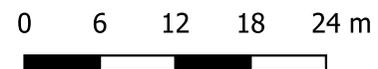
8

SRC:

ETRS 89
UTM ZONA 30

ESCALA:

1:600



AUTOR:

Adrián Portalés
Girona

**TÍTULO:**

PLANO EJEMPLO DE CURVAS CIRCULARES
DE UNIÓN CON MÉTODO TANGENTE

Nº PLANO:

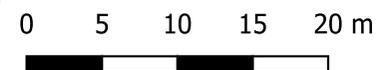
9

SRC:

ETRS 89
UTM ZONA 30

ESCALA:

1:500

**AUTOR:**

Adrián Portalés
Girona

724400.000

724450.000

724500.000

4464333.000

4464333.000

4464283.000

4464283.000

LEYENDA

- Clotoide de salida
- Clotoide de entrada
- Curva circular
- Rectas

724400.000

724450.000

724500.000

TÍTULO:

PLANO EJEMPLO DE LAS CLOTOIDES

Nº PLANO:

10

SRC:

ETRS 89
UTM ZONA 30

ESCALA:

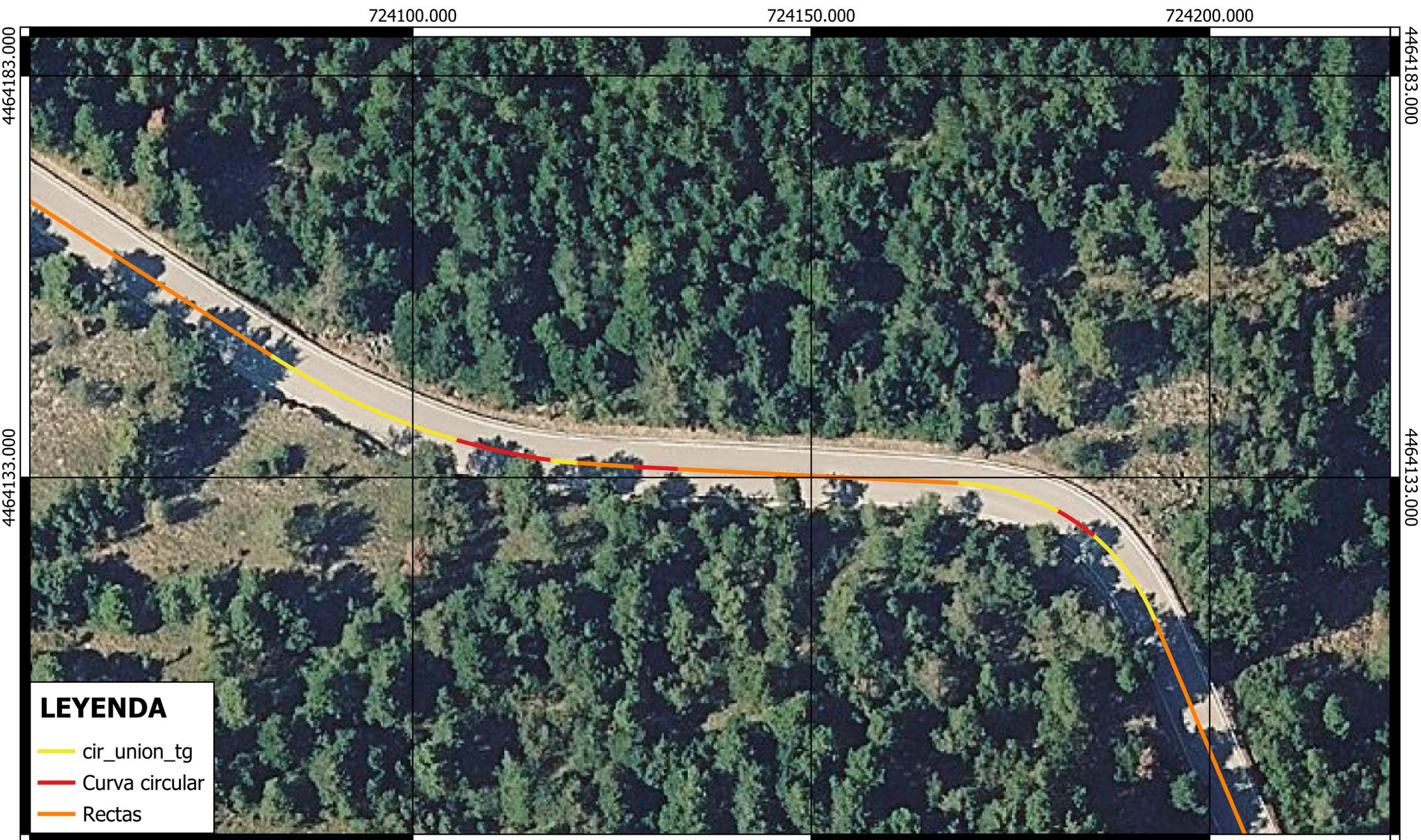
1:600

0 6 12 18 24 m



AUTOR:

Adrián Portalés
Girona



LEYENDA

- cir_union_tg
- Curva circular
- Rectas

TÍTULO:

PLANO EJEMPLO DE LAS CIRCULARES DE TRANSICIÓN

Nº PLANO:

11

SRC:

ETRS 89
UTM ZONA 30

ESCALA:

1:600



AUTOR:

Adrián Portalés
Girona

725500.000

725600.000

725700.000

4465045.000

4465045.000

4464945.000

4464945.000

725500.000

725600.000

725700.000

LEYENDA

-  Circunferencias aproximadas
-  Alineación básica
-  Curva de giro derecha
-  Curva de giro izquierda
-  Recta

TÍTULO:

PLANO EJEMPLO APROXIMACIÓN CIRCULAR

Nº PLANO:

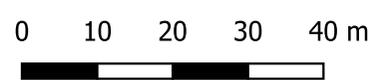
12

SRC:

ETRS 89
UTM ZONA 30

ESCALA:

1:1.000



AUTOR:

Adrián Portalés
Girona



LEYENDA

- Eje teórico
- Circular
- Clotoide
- Recta

TÍTULO:

PLANO EJE TEÓRICO DE CIVIL 3D

Nº PLANO:

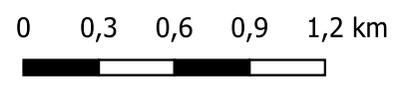
13

SRC:

ETRS 89
UTM ZONA 30

ESCALA:

1:30.000



AUTOR:

Adrián Portalés
Girona

723000.000

726000.000

729000.000

4466800.000

4466800.000

4463800.000

4463800.000

723000.000

726000.000

729000.000

LEYENDA

- Alineación teórica
- Curva circular
- Clotoide
- Recta

TÍTULO:

PLANO ALINEACIÓN TEÓRICA DEFINIDA

Nº PLANO:

14

SRC:

ETRS 89
UTM ZONA 30

ESCALA:

1:30.000

0 0,3 0,6 0,9 1,2 km



AUTOR:

Adrián Portalés
Girona

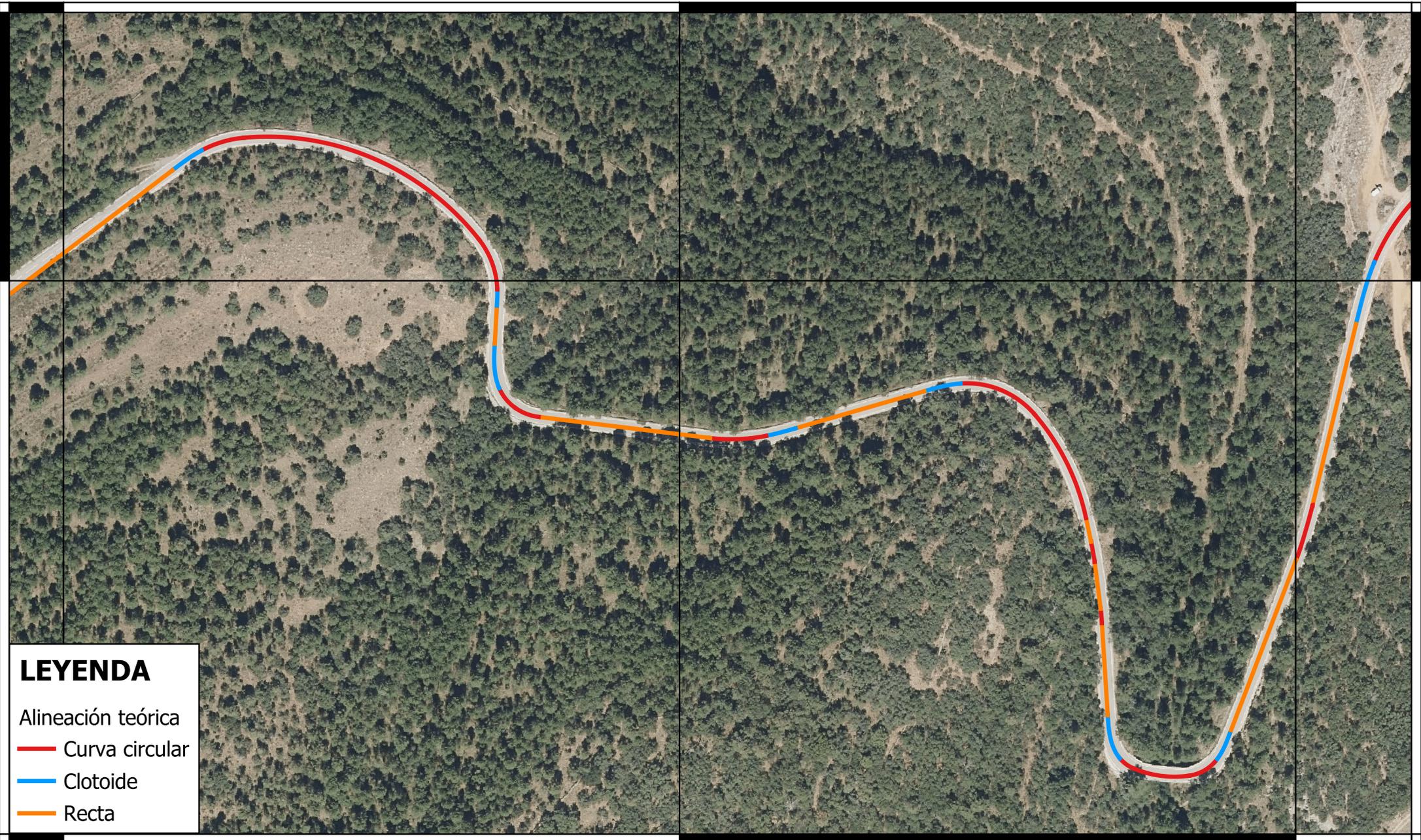
725500.000

725750.000

726000.000

4465000.000

4465000.000



LEYENDA

- Alineación teórica
- Curva circular
- Clotoide
- Recta

725500.000

725750.000

726000.000

TÍTULO:

PLANO EJEMPLO DE ALINEACIÓN TEÓRICA
DEFINIDA

Nº PLANO:

15

SRC:

ETRS 89
UTM ZONA 30

ESCALA:

1:2.000



AUTOR:

Adrián Portalés
Girona