



# UCASAL

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SALTA

Facultad de Ingeniería

**Ingeniería en Telecomunicaciones**

PROYECTO FINAL DE GRADO

**Despliegue de red RTK para agricultura de precisión**

**Autor:** Giménez Martín, Lautaro

**Tutor:** Breslin, Roberto Daniel

**2021**

**Ingeniería en Telecomunicaciones**

**Profesor Guía:**

Ing. Breslin, Roberto Daniel

.....

**Tribunal Evaluador:**

\_\_\_\_\_

.....

\_\_\_\_\_

.....

\_\_\_\_\_

.....

**Alumno:**

Giménez Martín, Lautaro

.....

**Fecha de exposición del trabajo:**

\_\_ / \_\_ / 2021

## **Agradecimientos**

Principalmente a mis padres, Gladys y Carlos, por todo el apoyo y cariño brindado en estos años, que finalmente me permiten escribirles estas líneas y compartir la inmensa alegría de terminar este ciclo. Pero más aún por dejarme ser la persona que hoy soy, y por estar siempre presentes para mostrarme distintos caminos y ayudarme a ser cada día mejor.

A mi abu Zaira, a quien voy a tener la suerte de abrazar luego de terminar la exposición y decirle lo mucho que la quiero. A la abu Trini, con quien algún día volveré a jugar al dominó y al abuelo Alberto, que no nos va a faltar oportunidad para compartir un trago y fumarnos unos cigarros por primera vez.

A Carlitos, el as de espadas... nada que decirte, tu conservadora nos está esperando afuera. Siempre vas a ser el mejor.

A los cracks de mis hermanos, Eze, Sol y el loco Pinzas, que siempre están ahí cuando los necesito, sea para risas, lágrimas, palizas en el truco o puteadas por hacer mucho ruido los jueves. Los quiero.

Al resto de mi familia, Tío Sergio, Ceci, mis primos Facu y Nano, Daniel y José que, como Ingeniero Agrónomo, me dio una mano en este trabajo.

A todos mis profesores, compañeros y amigos que me acompañaron en este hermoso camino, y en especial a esa hermosa melodía simple que siempre gira y gira en mi cabeza.

***Lautaro***

# Índice

|                                                             |      |
|-------------------------------------------------------------|------|
| Índice                                                      | iv   |
| Lista de Figuras                                            | viii |
| Lista de Tablas                                             | xi   |
| 1. Introducción                                             | 12   |
| 1.1. Planteamiento del problema                             | 12   |
| 1.2. Objetivo                                               | 12   |
| 1.3. Metodología                                            | 13   |
| 2. Sistemas de referencia y sistemas de tiempos             | 14   |
| 2.1. Sistemas de referencia                                 | 14   |
| 2.1.1. Sistema de Referencia Celeste Internacional (ICRS)   | 14   |
| 2.1.2. Sistema de Referencia Terrestre Internacional (ITRS) | 14   |
| 2.1.3. WGS-84                                               | 15   |
| 2.2. Sistemas de tiempos                                    | 15   |
| 2.2.1. Según la rotación de la Tierra                       | 16   |
| 2.2.2. Según la traslación de la Tierra                     | 17   |
| 3. Órbitas satelitales                                      | 19   |
| 3.1. Leyes de Kepler y Ley de Gravitación                   | 19   |
| 3.1.1. Primera ley de Kepler                                | 19   |
| 3.1.2. Segunda ley de Kepler                                | 20   |
| 3.1.3. Tercera ley de Kepler                                | 20   |
| 3.1.4. Ley de gravitación universal de Newton               | 20   |
| 3.2. Parámetros orbitales                                   | 21   |
| 3.2.1. Dimensiones y forma de la órbita                     | 21   |
| 3.2.2. Orientación del plano en el espacio                  | 22   |
| 3.2.3. Orientación de la órbita en el plano                 | 23   |
| 3.2.4. Posición del satélite en la órbita                   | 23   |
| 3.3. Perturbaciones orbitales                               | 23   |
| 3.3.1. Gravitacionales                                      | 23   |
| 3.3.2. No gravitacionales                                   | 23   |
| 4. Principio de funcionamiento de un sistema GNSS           | 24   |
| 4.1. Trilateración                                          | 24   |
| 4.1.1. En dos dimensiones                                   | 24   |
| 4.1.2. En tres dimensiones                                  | 25   |

|         |                                                                  |    |
|---------|------------------------------------------------------------------|----|
| 5.      | Segmentos de un sistema GNSS                                     | 27 |
| 5.1.    | Dentro del Sistema GPS                                           | 27 |
| 5.1.1.  | Segmento espacial                                                | 27 |
| 5.1.2.  | Segmento de control                                              | 29 |
| 5.1.3.  | Segmento usuario                                                 | 32 |
| 6.      | Tipos de medidas y fuentes de error                              | 34 |
| 6.1.    | Medidas de código                                                | 34 |
| 6.2.    | Medidas de fase                                                  | 35 |
| 6.3.    | Fuentes de error                                                 | 35 |
| 6.3.1.  | Errores en el segmento satelital                                 | 36 |
| 6.3.2.  | Errores en la propagación                                        | 37 |
| 6.3.3.  | Errores en el receptor                                           | 38 |
| 7.      | Métodos de posicionamiento GNSS                                  | 40 |
| 7.1.    | Posicionamiento absoluto                                         | 40 |
| 7.2.    | Posicionamiento relativo                                         | 41 |
| 8.      | Observables GPS                                                  | 43 |
| 8.1.    | Observables de tiempo                                            | 43 |
| 8.2.    | Observables de diferencia de fase                                | 44 |
| 9.      | Señales GPS                                                      | 48 |
| 9.1.    | CDMA y señales de espectro ensanchado                            | 48 |
| 9.2.    | Códigos pseudoaleatorios                                         | 52 |
| 9.2.1.  | Código C/A                                                       | 53 |
| 9.2.2.  | Código P                                                         | 54 |
| 9.3.    | Mensajes de navegación                                           | 56 |
| 9.4.    | Transmisión satelital                                            | 57 |
| 10.     | Combinación de fase de portadora y determinación de ambigüedades | 59 |
| 10.1.   | Simple diferencias de fase                                       | 59 |
| 10.2.   | Dobles diferencias                                               | 60 |
| 10.3.   | Triples diferencias                                              | 61 |
| 11.     | Sistema RTK                                                      | 62 |
| 11.1.   | Tipos de soluciones RTK                                          | 63 |
| 11.1.1. | Estación simple                                                  | 63 |
| 11.1.2. | Red de estaciones                                                | 63 |
| 11.2.   | Formatos y protocolos                                            | 64 |
| 11.2.1. | RTCM                                                             | 64 |

|          |                                                       |    |
|----------|-------------------------------------------------------|----|
| 11.2.2.  | Protocolo NTRIP                                       | 65 |
| 11.2.3.  | Protocolo NMEA                                        | 66 |
| 11.3.    | Técnicas de modelado de correcciones utilizando NTRIP | 67 |
| 11.3.1.  | Virtual Reference Station (VRS)                       | 67 |
| 11.3.2.  | Solución RTX                                          | 68 |
| 12.      | Despliegue de red RTK                                 | 69 |
| 12.1.    | Consideraciones previas                               | 69 |
| 12.2.    | Ecuación básica de transmisión                        | 71 |
| 12.3.    | Modelo de propagación Longley-Rice                    | 72 |
| 12.3.1.  | Datos de entrada                                      | 72 |
| 12.4.    | Cobertura Zona 1                                      | 74 |
| 12.4.1.  | Sitio 1                                               | 75 |
| 12.4.2.  | Sitio 2                                               | 76 |
| 12.4.3.  | Sitio 3                                               | 77 |
| 12.4.4.  | Sitio 4                                               | 78 |
| 12.4.5.  | Sitio 5                                               | 79 |
| 12.4.6.  | Sitio 6                                               | 79 |
| 12.4.7.  | Sitio 7                                               | 80 |
| 12.4.8.  | Sitio 8                                               | 81 |
| 12.4.9.  | Sitio 9                                               | 82 |
| 12.4.10. | Sitio 10                                              | 83 |
| 12.4.11. | Sitio 11                                              | 84 |
| 12.4.12. | Sitio 12                                              | 85 |
| 12.4.13. | Sitio 13                                              | 86 |
| 12.5.    | Zona 2                                                | 88 |
| 12.5.1.  | Sitio 1                                               | 88 |
| 12.5.2.  | Sitio 2                                               | 89 |
| 12.5.3.  | Sitio 3                                               | 90 |
| 12.5.4.  | Sitio 4                                               | 91 |
| 12.5.5.  | Sitio 5                                               | 92 |
| 12.5.6.  | Sitio 6                                               | 92 |
| 12.5.7.  | Sitio 7                                               | 93 |
| 12.5.8.  | Sitio 8                                               | 94 |
| 12.5.9.  | Sitio 9                                               | 95 |
| 12.5.10. | Sitio 10                                              | 96 |

|          |                                           |     |
|----------|-------------------------------------------|-----|
| 12.5.11. | Sitio 11                                  | 97  |
| 12.5.12. | Sitio 12                                  | 98  |
| 12.6.    | Zona 3                                    | 99  |
| 12.6.1.  | Sitio 1                                   | 99  |
| 12.6.2.  | Sitio 2                                   | 100 |
| 12.6.3.  | Sitio 3                                   | 101 |
| 12.6.4.  | Sitio 4                                   | 102 |
| 12.6.5.  | Sitio 5                                   | 103 |
| 12.6.6.  | Sitio 6                                   | 104 |
| 12.6.7.  | Sitio 7                                   | 105 |
| 12.6.8.  | Sitio 8                                   | 106 |
| 12.6.9.  | Sitio 9                                   | 107 |
| 12.6.10. | Sitio 10                                  | 108 |
| 12.7.    | Zona 4                                    | 110 |
| 12.7.1.  | Sitio 1                                   | 111 |
| 12.7.2.  | Sitio 2                                   | 112 |
| 12.7.3.  | Sitio 3                                   | 113 |
| 12.7.4.  | Sitio 4                                   | 114 |
| 12.7.5.  | Sitio 5                                   | 115 |
| 12.8.    | Zonas de Fresnel                          | 116 |
| 12.9.    | Equipos RTK                               | 118 |
| 12.9.1.  | Radios y antenas                          | 118 |
| 12.9.2.  | Consideraciones de instalación            | 120 |
| 12.10.   | Provisionamiento eléctrico                | 121 |
| 12.10.1. | Consumo de equipos y selección de paneles | 122 |
| 12.10.2. | Irradiación solar promedio                | 123 |
| 12.10.3. | Cantidad de paneles solares               | 124 |
| 12.10.4. | Cálculo de baterías                       | 124 |
| 12.10.5. | Cálculo del regulador                     | 124 |
| 12.11.   | Normativa vigente                         | 125 |
| 12.11.1. | Municipios                                | 125 |
| 12.11.2. | ANAC                                      | 125 |
| 12.11.3. | ENACOM                                    | 127 |
| 13.      | Conclusiones                              | 129 |
| 14.      | Bibliografía                              | 130 |

## Lista de Figuras

|                                                             |    |
|-------------------------------------------------------------|----|
| Figura 2-1. Sistema ECEF                                    | 15 |
| Figura 3-1. Primera ley de Kepler                           | 19 |
| Figura 3-2. Segunda ley de Kepler                           | 20 |
| Figura 3-3. Parámetros orbitales                            | 21 |
| Figura 3-4. Dimensiones y forma de órbita                   | 22 |
| Figura 4-1. Trilateración en dos dimensiones I              | 24 |
| Figura 4-2. Trilateración en dos dimensiones II             | 25 |
| Figura 4-3. Trilateración en dos dimensiones III            | 25 |
| Figura 4-4. Trilateración en tres dimensiones I             | 26 |
| Figura 4-5. Trilateración en tres dimensiones II            | 26 |
| Figura 5-1. Representación gráfica de los planos orbitales  | 28 |
| Figura 5-2. Sistema de control GPS                          | 30 |
| Figura 5-3. Base aérea Schriever, Colorado                  | 31 |
| Figura 5-4. Estación de monitoreo en la isla Diego García   | 31 |
| Figura 5-5. Antenas en la base aérea Vandenberg, California | 32 |
| Figura 5-6. Antena en la base aérea de Thule, Groenlandia   | 32 |
| Figura 5-7. Algunos tipos de receptores GPS                 | 33 |
| Figura 6-1. Medida de código                                | 34 |
| Figura 6-2. Medida de fase                                  | 35 |
| Figura 7-1. Posicionamiento absoluto                        | 41 |
| Figura 7-2. Posicionamiento relativo                        | 41 |
| Figura 8-1. Observable de código                            | 44 |
| Figura 8-2. Observable de fase absoluto                     | 45 |
| Figura 8-3. Observable de fase relativo                     | 46 |
| Figura 9-1. CDMA I                                          | 49 |
| Figura 9-2. CDMA II                                         | 49 |
| Figura 9-3. CDMA III                                        | 49 |
| Figura 9-4. CDMA IV                                         | 50 |
| Figura 9-5. CDMA V                                          | 50 |
| Figura 9-6. Modulaci3n BPSK con CDMA                        | 51 |
| Figura 9-7. Demodulaci3n con c3digo correcto                | 51 |
| Figura 9-8. Demodulaci3n con c3digo incorrecto              | 52 |
| Figura 9-9. Obtenci3n de c3digo C/A                         | 53 |
| Figura 9-10. Obtenci3n de X1                                | 54 |
| Figura 9-11. Obtenci3n de X2                                | 55 |
| Figura 9-12. Obtenci3n del C3digo P                         | 55 |
| Figura 9-13. Mensaje de navegaci3n                          | 56 |
| Figura 9-14. Generaci3n de se1al L1 y L2                    | 57 |
| Figura 9-15. Sistema de transmisi3n en el sat3lite          | 57 |
| Figura 11-1. Sistema RTK                                    | 63 |
| Figura 11-2. Protocolo NTRIP                                | 66 |

|                                           |     |
|-------------------------------------------|-----|
| Figura 11-3. Sistema VRS                  | 67  |
| Figura 11-4. Solución RTX                 | 68  |
| Figura 12-1. Departamento Anta, Salta     | 69  |
| Figura 12-2. Anta dividida en 4 zonas     | 70  |
| Figura 12-3. Cobertura zona 1             | 74  |
| Figura 12-4. Cobertura Zona 1 - Sitio 1   | 75  |
| Figura 12-5. Cobertura Zona 1 - Sitio 2   | 76  |
| Figura 12-6. Cobertura Zona 1 - Sitio 3   | 77  |
| Figura 12-7. Cobertura Zona 1 - Sitio 4   | 78  |
| Figura 12-8. Cobertura Zona 1 - Sitio 5   | 79  |
| Figura 12-9. Cobertura Zona 1 - Sitio 6   | 79  |
| Figura 12-10. Cobertura Zona 1 - Sitio 7  | 80  |
| Figura 12-11. Cobertura Zona 1 - Sitio 8  | 81  |
| Figura 12-12. Cobertura Zona 1 - Sitio 9  | 82  |
| Figura 12-13. Cobertura Zona 1 - Sitio 10 | 83  |
| Figura 12-14. Cobertura Zona 1 - Sitio 11 | 84  |
| Figura 12-15. Cobertura Zona 1 - Sitio 12 | 85  |
| Figura 12-16. Cobertura Zona 1 - Sitio 13 | 86  |
| Figura 12-17. Cobertura Zona 2            | 88  |
| Figura 12-18. Cobertura Zona 2 - Sitio 1  | 88  |
| Figura 12-19. Cobertura Zona 2 - Sitio 2  | 89  |
| Figura 12-20. Cobertura Zona 2 - Sitio 3  | 90  |
| Figura 12-21. Cobertura Zona 2 - Sitio 4  | 91  |
| Figura 12-22. Cobertura Zona 2 - Sitio 5  | 92  |
| Figura 12-23. Cobertura Zona 2 - Sitio 6  | 92  |
| Figura 12-24. Cobertura Zona 2 - Sitio 7  | 93  |
| Figura 12-25. Cobertura Zona 2 - Sitio 8  | 94  |
| Figura 12-26. Cobertura Zona 2 - Sitio 9  | 95  |
| Figura 12-27. Cobertura Zona 2 - Sitio 10 | 96  |
| Figura 12-28. Cobertura Zona 2 - Sitio 11 | 97  |
| Figura 12-29. Cobertura Zona 2 - Sitio 12 | 98  |
| Figura 12-30. Cobertura Zona 3            | 99  |
| Figura 12-31. Cobertura Zona 3 - Sitio 1  | 99  |
| Figura 12-32. Cobertura Zona 3 - Sitio 2  | 100 |
| Figura 12-33. Cobertura Zona 3 - Sitio 3  | 101 |
| Figura 12-34. Cobertura Zona 3 - Sitio 4  | 102 |
| Figura 12-35. Cobertura Zona 3 - Sitio 5  | 103 |
| Figura 12-36. Cobertura Zona 3 - Sitio 6  | 104 |
| Figura 12-37. Cobertura Zona 3 - Sitio 7  | 105 |
| Figura 12-38. Cobertura Zona 3 - Sitio 8  | 106 |
| Figura 12-39. Cobertura Zona 3 - Sitio 9  | 107 |
| Figura 12-40. Cobertura Zona 3 - Sitio 10 | 108 |
| Figura 12-41. Cobertura Zona 4            | 110 |
| Figura 12-42. Cobertura Zona 4 - Sitio 1  | 111 |
| Figura 12-43. Cobertura Zona 4 - Sitio 2  | 112 |
| Figura 12-44. Cobertura Zona 4 - Sitio 3  | 113 |
| Figura 12-45. Cobertura Zona 4 - Sitio 4  | 114 |

|                                                               |     |
|---------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 12-46. Cobertura Zona 4 - Sitio 5                      | 115 |
| Figura 12-47. Zonas de Fresnel I                              | 116 |
| Figura 12-48. Zonas de Fresnel II                             | 116 |
| Figura 12-49. Tractor con sistema StarFire 6000 RTK instalado | 118 |
| Figura 12-50. Estación base StarFire 3000 RTK                 | 119 |
| Figura 12-51. Instalación de antena cercana a torre.          | 120 |
| Figura 12-52. Instalación de antena cercana a árboles         | 120 |
| Figura 12-53. Reflejo producido por un edificio metálico      | 121 |
| Figura 12-54. Sistema fotovoltaico                            | 121 |
| Figura 12-55. Curva característica de panel solar             | 122 |
| Figura 12-56. Panel solar Gi-Power GP-150P-36                 | 123 |
| Figura 12-57. Irradiación promedio en Argentina               | 123 |
| Figura 12-58. Señalamiento diurno de torres de comunicaciones | 126 |
| Figura 13-1. Cobertura de red RTK                             | 129 |

## Lista de Tablas

|                                                    |    |
|----------------------------------------------------|----|
| Tabla 2-1. Sistema de tiempos                      | 15 |
| Tabla 5-1. Bloques satelitales I                   | 28 |
| Tabla 5-2. Bloques satelitales II                  | 29 |
| Tabla 6-1. Fuentes de error                        | 36 |
| Tabla 6-2. Errores en la propagación               | 38 |
| Tabla 9-1. Frecuencias derivadas de la fundamental | 55 |
| Tabla 10-1. Simples, dobles y triples diferencias  | 61 |

## 1. Introducción

Desde fines de la década del 60', con la creación del proyecto ARPANET y la aparición de lo que hoy llamamos Internet, el avance y evolución de todo tipo de tecnologías y redes de telecomunicaciones fueron creciendo de manera inimaginable, permitiendo lograr objetivos quizás impensados en aquellos tiempos.

Cotidianamente podemos ver con mucha naturalidad el avance de todo tipo de tecnologías, desde nuevos modelos de smartphones, redes 4G, 5G, 6G, hasta casas y ciudades inteligentes, solo por dar algunos ejemplos. Existen también importantísimos avances en áreas que nos afectan directamente, pero que para nosotros es algo “normal”.

Seguramente nadie se levanta pensando cómo hacen los productores de cereales, soja o legumbres para aumentar su productividad y hacer su negocio más rentable, ¿o sí? Total, tierra hay mucha, alguien la va a producir y de alguna u otra manera los alimentos que consumimos aparecerán en nuestra mesa.

Bueno, lamentablemente esto no es tan así y quien produce e invierte su dinero espera obtener la mayor cantidad de beneficios a cambio. Por suerte, mentes brillantes de todo el mundo no sólo pensaron en una revolución tecnológica respecto a juegos y realidad virtual, sino que buscaron, descubrieron e implementaron la forma de utilizar tecnología para aumentar la productividad en lo que a agricultura se refiere.

### 1.1. Planteamiento del problema

El GPS juega un rol vital en lo que es agricultura de precisión, ya que gracias a él podemos obtener coordenadas muy acertadas sobre la posición de algún objeto. Con esto, es posible que un tractor, una sembradora, fumigadora o cualquier otro vehículo pueda circular autónomamente por donde se lo programe previamente. O quizás no autónomamente, pero sí con una ruta preestablecida por algún motivo en particular, lo cual permitiría repetir el recorrido realizado por una sembradora para que la cosechadora siga sus mismos pasos, o para sembrar en los mismos lugares que años anteriores o en exactamente lugares distintos, dependiendo de lo que cada cultivo requiera.

El impedimento que se presenta para poder realizar estas actividades es la falta de inversión tecnológica en nuestro país, lógicamente de la mano con la inestabilidad económica que atravesamos hace más de medio siglo.

Hace años que se utiliza agricultura de precisión en Argentina, pero lamentablemente no está al alcance de todos los productores. La idea de este trabajo es sentar las bases para el despliegue de un conjunto de estaciones permanentes RTK, que puedan ser utilizadas por la mayor cantidad de productores posible.

## **1.2. Objetivo**

El objetivo final de esta tesis es aplicar la tecnología GPS-RTK en agricultura de precisión. Se empezará explicando los principios básicos de posicionamiento satelital para luego relacionar cómo se llevan a la práctica por medio del sistema GPS. Una vez entendido esto se seguirá con la explicación del sistema RTK, y cómo utiliza al sistema GPS para lograr su objetivo. Por último, se realizará el diseño de una red de antenas independientes RTK fijas para dar cobertura a todo el departamento de Anta, en la provincia de Salta.

## **1.3. Metodología**

Para hacer más sencilla la explicación, se dividió al departamento de Anta en cuatro zonas. Cada una de ellas contemplará la cantidad de estaciones RTK que sean necesarias para cubrir toda su área. Se utilizó el software Google Earth para marcar la posición de cada estación y el área que cubre a nivel del suelo.

Cada estación tendrá asociadas sus coordenadas geográficas en grados decimales, el tipo de patrón de radiación su antena, la altura de la torre donde se montará cada una y un radio de cobertura estimado.

Para garantizar la cobertura en la zona indicada, se escogerán puntos dentro de la misma donde se trazarán y documentarán los perfiles de elevación entre estos puntos y las coordenadas de la estación, teniendo en cuenta la altura de la torre, altura del receptor móvil (3 metros), línea de vista y zonas de Fresnel, utilizando la banda de frecuencias de 915-928 MHz, que en Argentina es una banda no licenciada.

## 2. Sistemas de referencia y sistemas de tiempos

### 2.1. Sistemas de referencia

Los sistemas de referencia son necesarios para modelar todo tipo de observaciones geodésicas. Estos sistemas están definidos en términos de orientación, métrica y curvatura, y, en principio, son sistemas tridimensionales. La cuarta dimensión, el tiempo, se contempla con base en los movimientos de la Tierra, sus deformaciones y los movimientos de cuerpos celestes.

De la misma forma como se pueden definir sistemas de referencia para la Tierra, se pueden hacer para la Luna y el resto de los cuerpos del Sistema Solar. Las observaciones y modelos derivados de ellas necesitan de la definición de unidades de medida. Estas unidades son tomadas del Sistema Internacional, utilizando el metro [m] para la longitud, el kilogramo [kg] como unidad de masa y el segundo [s] como unidad de tiempo.

Un sistema de referencia define un conjunto de constantes, teorías, hipótesis y parámetros, los cuales sirven como una base matemática para situar coordenadas en el espacio de manera que se puedan calcular la posición y movimiento de los puntos de la Tierra.

Fundamentalmente debe definirse el origen del sistema, las direcciones de sus ejes, las escalas utilizadas, los algoritmos para sus transformaciones espaciales y temporales, todas las constantes utilizadas en las definiciones y debe tener asociado un elipsoide característico. Ejemplos de sistemas de referencia pueden ser el ICRS, el ITRS, el ETRS-89 y el WGS-84 utilizado por el GPS.

#### 2.1.1. Sistema de Referencia Celeste Internacional (ICRS)

Es un sistema de referencia con origen en el baricentro del sistema solar y con ejes con direcciones fijas, creado para representar de la forma más apropiada las posiciones y movimientos de objetos celestes. Utiliza el sistema de tiempo dinámico baricéntrico.

Al no depender de ningún movimiento de la Tierra, este sistema es utilizado para referirse a las observaciones realizadas desde nuestro planeta y a él se le asocian los parámetros de rotación terrestre.

#### 2.1.2. Sistema de Referencia Terrestre Internacional (ITRS)

Es un sistema geocéntrico fijado al centro de masas terrestre, que se utiliza para referirse a posiciones y movimientos en la Tierra. Para representar coordenadas cartesianas utiliza el sistema ECEF (Figura 2-1) y al elipsoide característico GRS80.

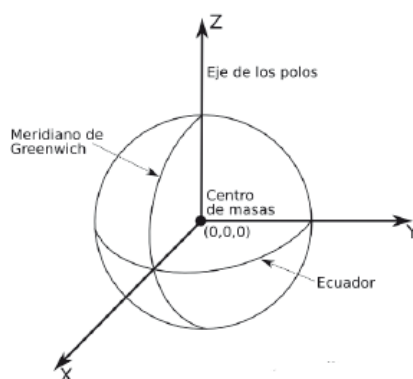


Figura 2-1. Sistema ECEF

### 2.1.3. WGS-84

El sistema geodésico mundial es un sistema de referencia terrestre utilizado por el sistema GPS, con origen en el centro de masas de la Tierra. Al igual que en ITRS, utiliza al sistema ECEF para representar coordenadas cartesianas tridimensionales.

El marco de referencia WGS está constituido por los satélites y efemérides transmitidas. WGS-84 utilizó de referencia en sus orígenes al elipsoide GRS80, pero fue sujeto a mejoras en ediciones posteriores, por lo que se creó un nuevo elipsoide llamado con el mismo nombre que el sistema.

## 2.2. Sistemas de tiempos

Así como los sistemas de referencia son imprescindibles para el correcto posicionamiento en el espacio, los sistemas de tiempo tienen un mismo grado de importancia puesto que son necesarios para realizar mediciones de forma inequívoca. Desde hace siglos que el ser humano está interesado sobre este tema, tomando referencias de tiempo muy diversas, desde la misma rotación de la Tierra, péndulos y resortes hasta oscilaciones atómicas y moléculas que absorben pulsos de energía. Para explicar brevemente las diferencias entre algunos de los sistemas de tiempo más conocidos se clasificarán en tres tipos de fenómenos periódicos, tal como lo muestra la Tabla 2-1.

| Fenómeno periódico      | Tiempo                                                                               |
|-------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| Rotación de la Tierra   | Tiempo sidéreo<br>Tiempo solar<br>Tiempo universal UT0, UT1, UT2                     |
| Traslación de la Tierra | Tiempo dinámico terrestre<br>Tiempo dinámico baricentro                              |
| Osciladores atómicos    | Tiempo atómico internacional, TAI<br>Tiempo universal coordinado, UTC<br>Tiempo GNSS |

Tabla 2-1. Sistema de tiempos

Tantos años de observaciones e investigación fueron mejorando paso a paso los sistemas de tiempo. Por ejemplo, los sistemas basados en la rotación de la Tierra, que intuitivamente fueron los primeros en ser utilizados, fueron quedando muy obsoletos en

aplicaciones en las que se requiere mucha precisión, debido a la aceleración errática de la Tierra que puede generar cambios del orden de los milisegundos por día.

## **2.2.1. Según la rotación de la Tierra**

### **2.2.1.1. *Tiempo Sidéreo***

Mide el tiempo transcurrido entre dos pasos consecutivos del punto Aries, es decir el tiempo que tarda la Tierra en girar sobre sí misma, pero tomando como referencia dicho punto. Utiliza como referencia de longitudes el meridiano de Greenwich y tarda 23h 56m y 4.091s. Se utiliza para relacionar los sistemas de referencia terrestre y celeste.

### **2.2.1.2. *Tiempo Solar***

Representa el horario del Sol, es decir, el tiempo transcurrido entre dos pasos del Sol por el meridiano del lugar de observación. Puede dividirse al tiempo solar en dos categorías:

- Tiempo solar verdadero: se sustenta en el día solar verdadero, que es el intervalo entre dos pasos sucesivos del Sol por el meridiano de observación. Puede ser medido con un reloj de sol, y se corresponde con el amanecer, el mediodía o el anochecer. En otras palabras, se basa en lo que es posible observar de manera directa.
- Tiempo solar medio: está basado en un sol ficticio que se mueve a una velocidad constante a lo largo del año, y es la base para definir el día solar medio de 24 horas. Se corresponde con el tiempo civil y se coordina mediante el Tiempo Medio de Greenwich.

### **2.2.1.3. *Tiempo Universal***

Se basa en la medición del periodo de rotación de la Tierra a partir de referencias astronómicas, pero el problema radica en que la rotación presenta anomalías. Estos períodos se obtienen a partir de una red de estaciones de observación, y en función de las anomalías corregidas se definen distintos UT.

- UT0 es el tiempo basado en la rotación instantánea de la Tierra, que no es uniforme. Es determinado por observaciones astronómicas diferentes al Sol, tales como pueden ser el movimiento de estrellas o satélites artificiales. Se considera que la ubicación del observatorio tiene coordenadas fijas en un marco de referencia terrestre, pero la posición del eje de rotación de la Tierra realiza un movimiento polar, por lo que se producen errores en las mediciones. UT0 no contiene ninguna corrección para el movimiento polar.
- UT1 es el tiempo UT0, pero con correcciones de las variaciones periódicas producidas por el movimiento del polo. Es útil como medida angular, pero no como sistema de tiempo.
- UT2, o también llamado GMT, se obtiene corrigiendo el UT1 de otras irregularidades de la rotación de la Tierra, por ejemplo, las mareas. Esta es la escala más precisa, pero sigue siendo irregular.

## 2.2.2. Según la traslación de la Tierra

### 2.2.2.1. *Tiempo dinámico terrestre*

A diferencia de los tiempos basados en la rotación terrestre, el tiempo dinámico terrestre está referido al movimiento orbital de la Tierra alrededor del Sol. Es un tiempo no relativista que se emplea para el cálculo de efemérides y de movimientos de cuerpos celestes.

### 2.2.2.2. *Tiempo dinámico baricéntrico*

Es un sistema inercial de escala de tiempo, medido en un sistema definido con origen en el baricentro del Sistema Solar. Es destinado al uso astronómico ya que tiene en cuenta la dilatación del tiempo al calcular órbitas y cálculos en sistemas celestes.

### 2.2.2.3. *Osciladores atómicos*

- Tiempo atómico

Con el avance de la tecnología fue posible definir escalas de tiempo independientes del movimiento de la Tierra, con una gran precisión y estabilidad. El tiempo atómico constituye una referencia temporal mantenida por una red de 200 relojes atómicos distribuidos en más de 60 países.

En 1967 se definió el segundo internacional como la duración de 9192631770 períodos de la radiación correspondiente a la transición entre dos niveles hiperfinos del estado fundamental del átomo cesio 133.

El TAI fue sincronizado inicialmente con el UT2 el 1 de enero de 1958, momento en el que ambos sistemas fueron equivalentes, pero, que a lo largo del tiempo no se puede mantener debido a la escala continua de tiempo de este sistema, a diferencia del UT2 que depende de la rotación no constante de la Tierra.

- Tiempo universal coordinado

Es un tiempo atómico que tiene la misma frecuencia que el TAI, pero que cada cierto tiempo se añaden o retrasan segundos extras (leap seconds) para mantenerlo cohesionado con la rotación terrestre. La diferencia con el TAI es de  $\pm 0.9$  segundos.

- Tiempo GPS

Es una escala de tiempo atómica que no es alterado por los leap seconds, es decir, es un tiempo continuo. Es mantenido por el segmento de control GPS a partir de una red de relojes atómicos. Toma como referencia un reloj maestro situado en Washington, más precisamente en el Observatorio Naval, aunque también existe uno alternativo en la estación maestra de control GPS en Schriever, Colorado.

Toma como época de origen las 0 horas UTC de la noche del 5 al 6 de enero de 1980, por lo que este es el tiempo cero de referencia y a partir del cual se enumeran las semanas GPS, en ciclos de 1024 semanas.

El día de la semana GPS corresponde a la numeración de días dentro de cada semana, en la que corresponde el 0 para el domingo y el 6 para el sábado.

Para determinados cálculos, como ser el tiempo de efemérides, se utiliza el número de segundos transcurridos desde el inicio de la semana (0 horas del domingo), cuyos valores están comprendidos entre el 0 y 604800.

### 3. Órbitas satelitales

Todo GNSS se basa en el concepto de medir, mediante diversos métodos, la distancia entre distintos satélites y un punto en la Tierra, para luego determinar la ubicación de este último. Sabiendo esto, es indispensable que el receptor conozca la posición de todos los satélites en un determinado momento. Esta información, que consiste en una serie de parámetros que se explicarán en este apartado, es transmitida periódicamente por cada satélite hacia la Tierra en su mensaje de navegación.

Para poder comprender cómo esto es posible y que inconvenientes surgen al momento de localizar un satélite, es necesario describir cómo es el movimiento de éstos alrededor de la Tierra. La teoría de órbitas satelitales tiene su fundamento en las tres leyes de Kepler y en la ley de gravitación universal de Newton.

#### 3.1. Leyes de Kepler y Ley de Gravitación

##### 3.1.1. Primera ley de Kepler

Los planetas giran alrededor del Sol siguiendo una trayectoria elíptica, donde el Sol se sitúa en uno de los focos de la elipse. Esto, llevándolo a un sistema GNSS, sirve para determinar la forma de la elipse en donde se desplazan los satélites, siendo la Tierra uno de sus focos. El parámetro que describe la forma de la elipse es la excentricidad, valor que viene dado por

$$\varepsilon = \sqrt{1 - \frac{b^2}{a^2}}$$

Donde  $a$  es el semieje mayor y  $b$  el semieje menor.

En la práctica satelital las órbitas que se describen son prácticamente circulares, con  $\varepsilon \approx 0$ .

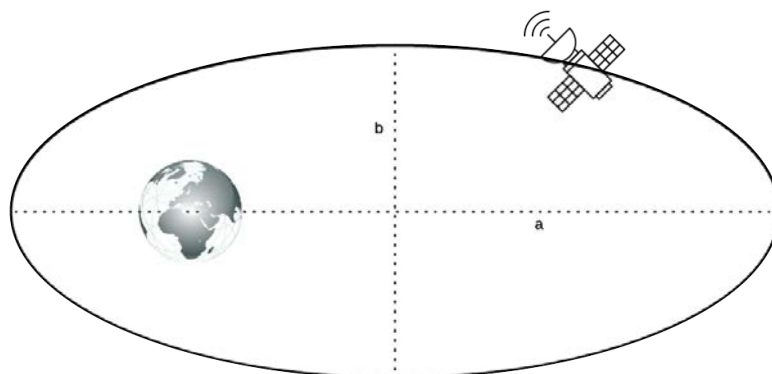


Figura 3-1. Primera ley de Kepler

### 3.1.2. Segunda ley de Kepler

La recta que une cada planeta con el sol barre áreas iguales en tiempos iguales. Esto significa que, en el recorrido por su órbita, cada planeta se mueve más rápidamente a medida que se acerca al Sol y más lentamente cuando se aleja del mismo. En GNSS este concepto es equivalente para cada satélite, respecto a la Tierra.

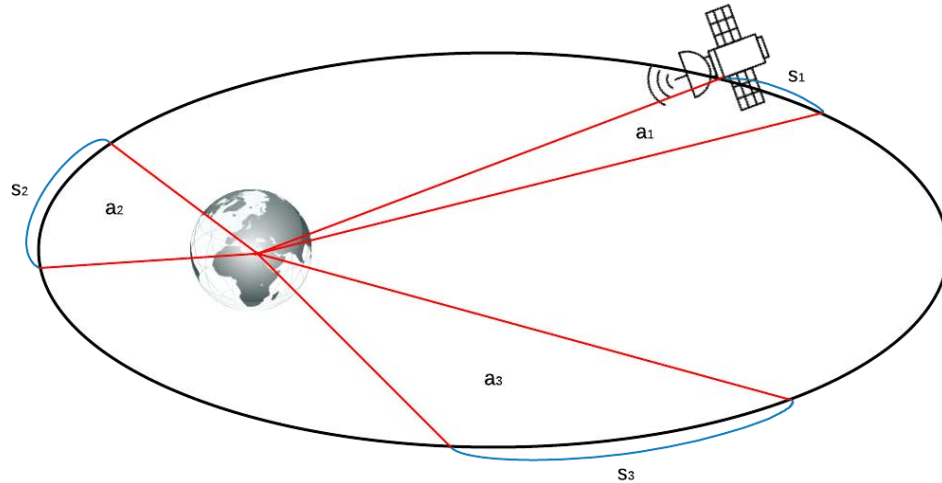


Figura 3-2. Segunda ley de Kepler

Esto quiere decir que el tiempo que el satélite tarda en recorrer el segmento s1 es igual al tiempo que demora en recorrer s2 y s3, por lo que las áreas a1, a2 y a3 son iguales.

### 3.1.3. Tercera ley de Kepler

Para un planeta dado, el cuadrado de su periodo orbital es proporcional al cubo de su distancia media al Sol. Es decir, relaciona lo que tarda un planeta en completar una vuelta alrededor del Sol con sus radios medios. Matemáticamente,

$$T^2 = k * r^3$$

Donde

- T es el periodo del planeta medido en segundos.
- k es la constante de proporcionalidad, cuya unidad es s<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>.
- r es la distancia media al Sol. Por las propiedades de la elipse se cumple que su valor coincide con el del semieje mayor de la elipse, a, y se mide en metros.

La consecuencia de esta ley aplicada a los GNSS es que los satélites se mueven más despacio cuanto mayor es su órbita.

### 3.1.4. Ley de gravitación universal de Newton

Establece la fuerza con la que se atraen dos cuerpos por el solo hecho de tener masa. Estos se atraen con una fuerza proporcional al cuadrado de sus masas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que los separa, y está dirigida en la línea recta que une a los cuerpos. Esto es

$$\vec{F}_g = G * \frac{m_1 * m_2}{d^2} * \vec{u}$$

Donde

- $\vec{F}_g$  es el vector fuerza, cuya unidad es el newton (N).
- G es la constante de gravedad cuyo valor es  $6,67 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{kg}^2$ .
- $m_1$  y  $m_2$  son las masas de los cuerpos que interaccionan y se miden en kilogramo.
- d es la distancia que separa ambos cuerpos, medida en metros.
- $\vec{u}$  es un vector unitario entre  $m_1$  y  $m_2$ .

### 3.2. Parámetros orbitales

Según todas estas leyes, trasladadas a un sistema GNSS, un satélite tiene una posición específica, que es determinada por seis parámetros, clasificados en cuatro categorías.

- Dimensiones y forma de la órbita
  - o Parámetro “a”: semieje mayor de la elipse.
  - o Parámetro “e”: excentricidad.
- Orientación del plano en el espacio
  - o Parámetro “ $\Omega$ ”: ascensión del nodo.
  - o Parámetro “I”: inclinación.
- Orientación de la órbita en el plano
  - o Parámetro “ $\omega$ ”: argumento del perigeo.
- Posición del satélite en la órbita
  - o Parámetro “V”: anomalía.

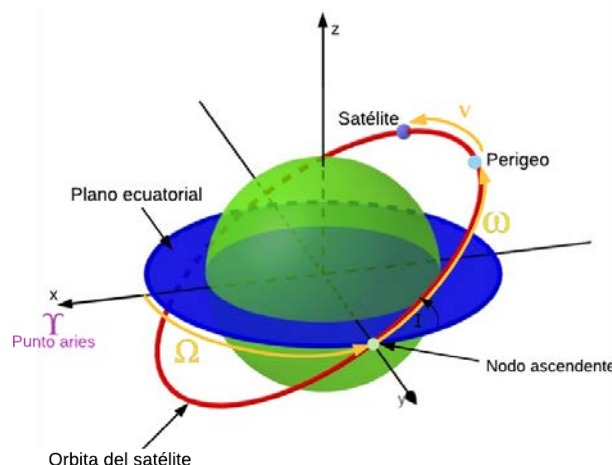


Figura 3-3. Parámetros orbitales

#### 3.2.1. Dimensiones y forma de la órbita

Al hacer referencia a órbitas elípticas, éstas pueden variar su tamaño y forma de acuerdo con la dimensión de sus ejes. Para ello se establecen parámetros que permitan identificar su dimensión y forma de manera inequívoca.

Uno de esos es el parámetro “a”, que es el valor del semieje mayor de la elipse y viene dado por la siguiente fórmula

$$a = \frac{d_{apogeo} + d_{perigeo}}{2}$$

$d_{apogeo}$  es la distancia Tierra-satélite cuando este último se encuentra en el apogeo, que es el punto donde se alcanza la distancia máxima entre ellos, mientras que  $d_{perigeo}$  es la distancia cuando el satélite se encuentra en el perigeo, punto donde ésta es mínima.

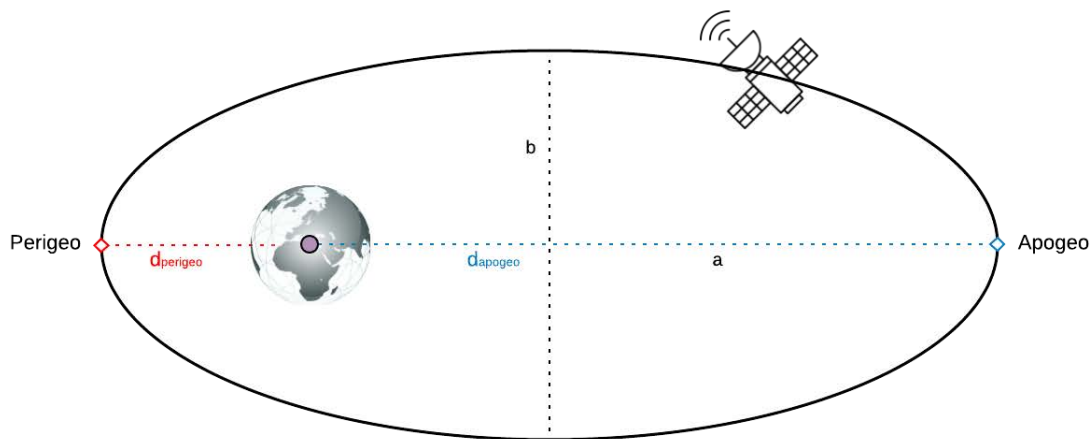


Figura 3-4. Dimensiones y forma de órbita

Y otro es el parámetro “ε”, que es la excentricidad de la elipse y viene dado por

$$\varepsilon = \sqrt{1 - \frac{b^2}{a^2}}$$

Donde a y b son los semiejes mayor y menor, respectivamente.

### 3.2.2. Orientación del plano en el espacio

Para detallar los parámetros de un plano orbital es necesario marcar previamente algunas referencias. Vale aclarar que el plano orbital es el que contiene a la órbita, mientras que el plano ecuatorial es el que contiene al ecuador. El punto aries (Υ) es un punto de referencia que se ubica en la línea en que intersecan el plano ecuatorial y el plano de la eclíptica (plano medio de la órbita de la Tierra alrededor del Sol). En GNSS lo que nos interesa es la dirección de ese punto respecto a la Tierra, a la que llamaremos dirección aries.

Una órbita interseca con el plano ecuatorial generando dos nodos. El que nos interesa es el nodo ascendente, que es el punto donde el satélite pasa desde el hemisferio sur terrestre al hemisferio norte. El nodo descendente es el punto en el que ocurre exactamente lo contrario.

El parámetro  $I$ , llamado de inclinación, es el que indica el ángulo que forma el plano orbital con el ecuador. Puede tomar valores desde  $0^\circ$  a  $180^\circ$ .

El parámetro  $\Omega$ , que es la ascensión del nodo, indica el ángulo formado desde la dirección aries hasta el punto nodo ascendente. Sus valores pueden ser de  $0^\circ$  a  $360^\circ$ .

### **3.2.3. Orientación de la órbita en el plano**

La orientación de la órbita en el plano queda dada por el parámetro  $\omega$ , que se llama argumento del perigeo. Es ángulo que forma el nodo ascendente y el perigeo y se mide positivamente en el sentido del movimiento del satélite. Este parámetro puede tomar valores entre  $0^\circ$  y  $360^\circ$ .

### **3.2.4. Posición del satélite en la órbita**

Estableciendo los parámetros anteriores, ya se puede localizar una órbita de manera inequívoca. Lo que resta conocer que es de vital importancia para un sistema GNSS, es la ubicación de un satélite dentro de esa órbita.

El parámetro que nos permite obtener esa posición es el de anomalía verdadera ( $V$ ). Este parámetro es el ángulo que forma el perigeo con el satélite, y se mide positivamente en el sentido del movimiento de éste. En el caso ideal, es el único parámetro que cambia continuamente debido al movimiento de los satélites.

## **3.3. Perturbaciones orbitales**

Los satélites que recorren las órbitas Keplerianas descriptas anteriormente, sufren alteraciones que hacen que se desvíen de las mismas. Estas alteraciones se pueden clasificar en dos tipos de fuerzas perturbadoras:

### **3.3.1. Gravitacionales**

Asimetría terrestre: El hecho de que la Tierra no es una esfera perfecta introduce un problema al momento de definir una órbita, en este caso una satelital. Al ser sus polos achatados y tener protuberancia ecuatorial, hace que el campo gravitatorio terrestre no sea homogéneo, lo que produce un desvío en la línea de los nodos y por lo tanto un error en el resto de los parámetros orbitales.

Fuerzas gravitatorias de la Luna y el Sol: por el mero hecho de tener masa, la luna y el sol experimentan una fuerza gravitatoria con los satélites, lo que causa una desviación que hace que no sigan correctamente su órbita teórica.

### **3.3.2. No gravitacionales**

Presión por radiación: es causada por los fotones de baja energía emitidos por el Sol. Genera caídas en la altura del perigeo y cambios en la excentricidad, lo que genera errores en la definición de la órbita.

Efectos relativistas: según la teoría de la relatividad, los relojes del satélite y los terrestres, por estar moviéndose a velocidades diferentes, el tiempo pasará más lentamente en uno que en otro, por lo que por más que se sincronicen al inicio estos se

desincronizarán con el paso del tiempo y producirán errores al momento de predecir la posición del satélite.

## 4. Principio de funcionamiento de un sistema GNSS

### 4.1. Trilateración

La idea de los sistemas de posicionamiento es usar la técnica de trilateración, que nos permite conocer la posición relativa de un punto utilizando las posiciones conocidas de dos o más puntos de referencia, en conjunto con las distancias medidas entre el punto en cuestión y cada punto de referencia.

En lo que a nosotros nos interesa, el punto en cuestión es un receptor satelital, mientras que los puntos de referencia son los satélites, cuyas posiciones se presupone que son conocidas en todo momento. La medida de distancia entre cada uno de estos puntos la realiza el receptor, por medio de técnicas que se detallarán más adelante.

El concepto de trilateración funciona en cálculos tanto de dos como de tres dimensiones. Para explicar esta técnica, se muestran progresivamente las posibles soluciones del problema, observando uno, dos y tres satélites, y considerando que el receptor adquiere todas las señales que necesita sin haber cambiado de posición entre la recepción de las señales de los distintos satélites.

#### 4.1.1. En dos dimensiones

1. Recibiendo señales desde un solo satélite, se obtiene una única distancia  $d_1$  (distancia satélite-receptor), por lo que el punto A (receptor) podría estar sobre cualquiera de los infinitos puntos de la circunferencia que se forma con dicha distancia.

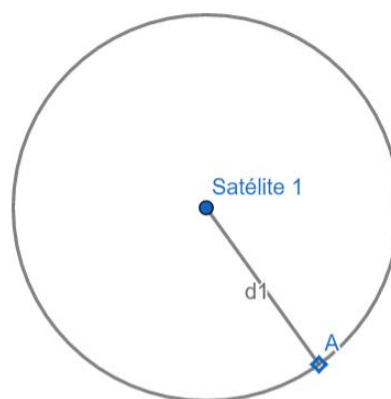


*Figura 4-1. Trilateración en dos dimensiones I*

2. Si se obtienen señales desde otro satélite, entonces también conocemos la distancia hacia este otro,  $d_2$ , por lo que ahora contamos con una nueva

circunferencia. Vemos que ambas intersecan en dos puntos, a los que llamaremos A y B, los cuales son las posibles soluciones al problema.

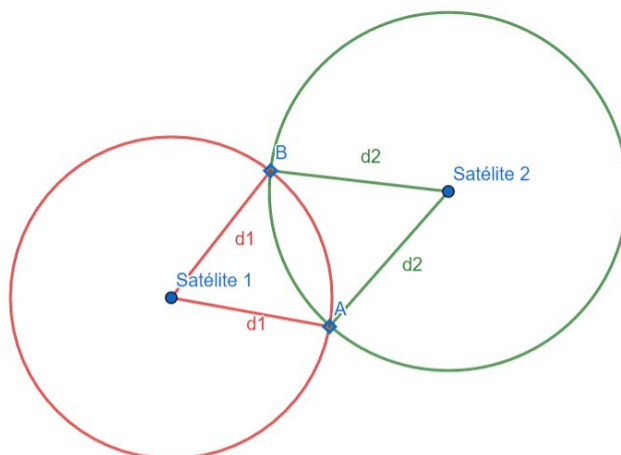


Figura 4-2. Trilateración en dos dimensiones II

3. Para poder decidir inequívocamente cuál de estos dos puntos es el correcto, se procede a realizar una tercera medición,  $d_3$ , hacia un tercer satélite. La solución queda reducida a un único punto en el plano y corresponde con la intersección entre las tres circunferencias.

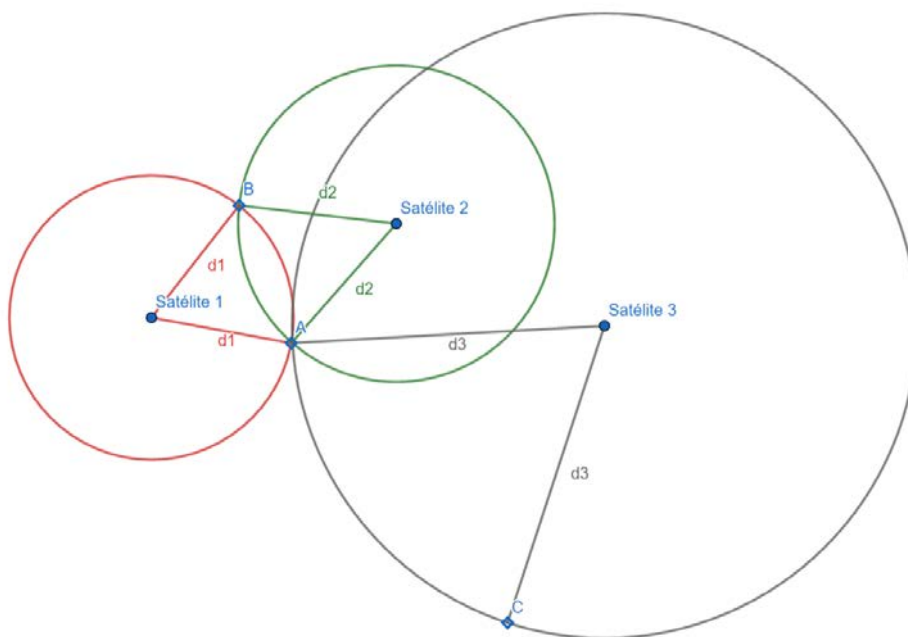


Figura 4-3. Trilateración en dos dimensiones III

El procedimiento anterior fue descrito en un ambiente de dos dimensiones. Para un espacio tridimensional, al hacer las mediciones de distancias lo que se obtiene no son circunferencias, sino esferas en donde el receptor puede estar sobre cualquier punto de su superficie.

#### 4.1.2. En tres dimensiones

1. Recibiendo las señales de dos satélites, A y B, obtenemos la distancia hacia cada uno de ellos. Esto genera dos esferas, cuya intersección nos brinda los posibles puntos sobre donde que puede encontrarse el receptor. Esta posible solución está formada por infinitos puntos que corresponden a una circunferencia, que llamaremos A-B.

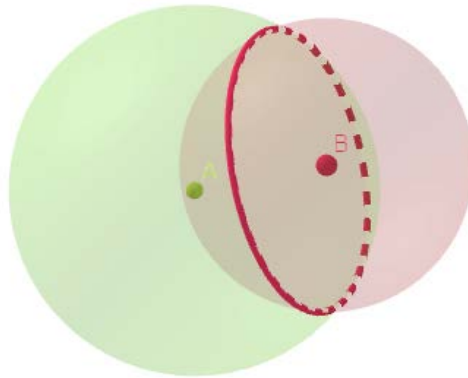


*Figura 4-4. Trilateración en tres dimensiones I*

2. Obteniendo las señales de un tercer satélite, C, también obtenemos una tercera distancia que nos genera otra esfera. La intersección entre las esferas de los satélites B y C nos brinda otra circunferencia, B-C, la cual coincide con la circunferencia A-B en exactamente dos puntos, que llamaremos M y N.

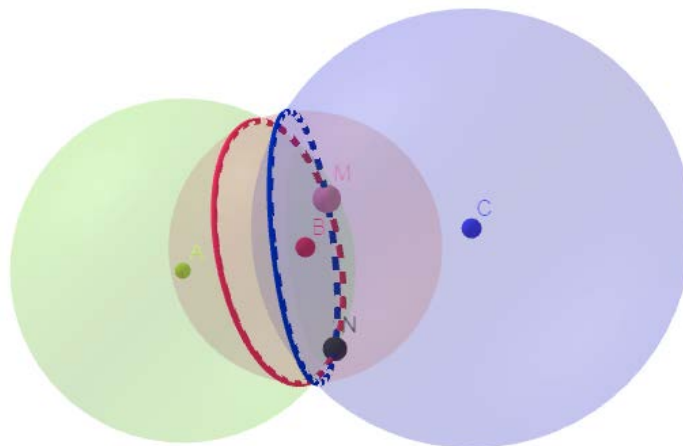


*Figura 4-5. Trilateración en tres dimensiones II*

3. Con estas tres mediciones es posible inferir el punto correcto, dado que una de las soluciones se presenta en una posición por encima de la altitud de los

satélites. En la práctica se utilizan uno o más satélites extra para eliminar ciertos errores que se mencionarán más adelante, aumentando así la precisión del sistema.

## 5. Segmentos de un sistema GNSS

Para brindar una noción general del funcionamiento práctico del sistema, es necesario detallar sus partes y el rol que cumple cada una, por lo que se empezará clasificándolas en tres segmentos, los cuales son válidos para cualquier sistema GNSS.

- **Segmento espacial:** está formado por los satélites, dispuestos en determinadas cantidades y órbitas, los cuales son los encargados de la transmisión de las señales.
- **Segmento de control:** cada satélite debe ser sometido a un mantenimiento constante, ya que éstos sufren desajustes en sus relojes y en sus trayectorias. Además, se debe monitorear el estado de sus componentes y solucionar eventuales problemas. Todo esto es realizado por estaciones terrestres ubicadas en todo el planeta, las cuales están en permanente comunicación con cada satélite.
- **Segmento de usuario:** está formado por los equipos receptores en Tierra, quienes son los encargados de recibir la información proveniente de los satélites y usarlas para realizar la geolocalización de su propia posición.

### 5.1. Dentro del Sistema GPS

#### 5.1.1. Segmento espacial

Está formado por una constelación de satélites, los cuales son los encargados de la transmisión de señales de radiofrecuencia a los usuarios.

Al día 15 de junio de 2021 la constelación GPS cuenta con un total de 31 satélites operacionales. Dicha constelación está organizada en seis planos orbitales, distanciados de forma equidistante, aproximadamente a 20.000 kms de la superficie terrestre. Cada plano orbital contiene de 4 a 6 slots, que son los espacios donde se ubican cada uno de los satélites. Cada uno de ellos se caracteriza por pertenecer a un único plano orbital, y, dentro del mismo, por estar ubicado en su slot correspondiente. Todo satélite recibe un SVN (del inglés, Space Vehicle Number) y un PRN (del inglés, PseudoRandom Noise) únicos en una determinada época.

El SVN es el número de cada satélite y no cambia nunca; se podría decir que es el “nombre” del satélite. En cambio, un PRN es un código asignado a cada satélite y puede cambiar a lo largo de la vida útil de cada uno. Los PRN son importantes porque permiten que los receptores puedan identificar inequívocamente a cada satélite desde el punto de vista físico de la señal, debido a que este código es usado en la modulación.

A lo largo de la historia del GPS se lanzaron diferentes generaciones de satélites. A continuación, se muestran todas las que están operativas junto con algunas de sus características más importantes.

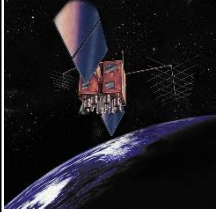
|                                         |                                                                                   |                                                                                   |                                                                                    |                                                                                                        |
|-----------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                         |  |  |  |                     |
| Bloque                                  | IIR                                                                               | IIR-M                                                                             | IIF                                                                                | GPS III/IIIF                                                                                           |
| Satélites operacionales                 | 8                                                                                 | 7                                                                                 | 12                                                                                 | 4                                                                                                      |
| Señales y códigos                       | Código C/A en L1                                                                  | Todas de IIR                                                                      | Todas de IIR-M                                                                     | Todas de IIF                                                                                           |
|                                         | Código P(Y) en L1 y L2                                                            | Nueva señal civil L2C                                                             | Nueva señal civil L5                                                               | Nueva señal civil L1C                                                                                  |
| Tiempo de vida esperado según el diseño | 7,5 años                                                                          | 7,5 años                                                                          | 12 años                                                                            | 15 años                                                                                                |
| Otros                                   | -                                                                                 | -                                                                                 | Relojes atómicos avanzados                                                         | Mejoras en la precisión y confiabilidad de las señales<br><br>Sin opción de “disponibilidad selectiva” |
|                                         |                                                                                   |                                                                                   | Mejoras en precisión, potencia y calidad de las señales                            |                                                                                                        |
| Lanzamiento                             | 1997-2004                                                                         | 2005-2009                                                                         | 2010-2016                                                                          | 2018-presente                                                                                          |

Tabla 5-1. Bloques satelitales I

En la tabla 5-1 no aparecen los bloques I ni IIA debido a que no quedan satélites de esas generaciones operativos actualmente.

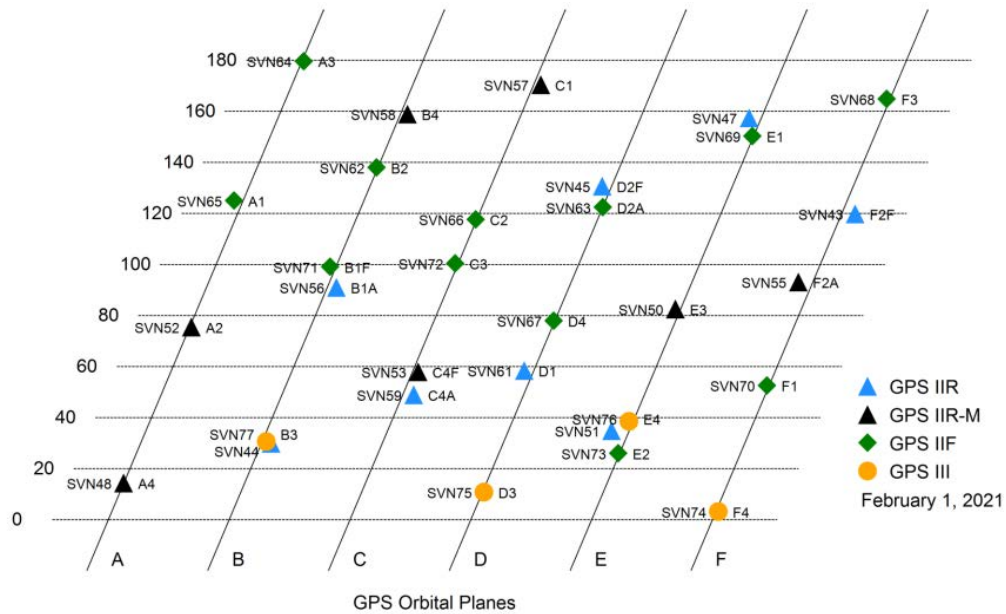


Figura 5-1. Representación gráfica de los planos orbitales

En la tabla 5-2 se mencionan todos los satélites pertenecientes a la constelación, con sus respectivos datos.

| Plano | Slot | SVN | PRN | Bloque | Reloj   |
|-------|------|-----|-----|--------|---------|
| A     | 1    | 65  | 24  | IIF    | Cesio   |
| A     | 2    | 52  | 31  | IIR-M  | Rubidio |
| A     | 3    | 64  | 30  | IIF    | Rubidio |
| A     | 4    | 48  | 7   | IIR-M  | Rubidio |
| B     | 1    | 56  | 16  | IIR    | Rubidio |
| B     | 2    | 62  | 25  | IIF    | Rubidio |
| B     | 3    | 44  | 28  | IIR    | Rubidio |
| B     | 4    | 58  | 12  | IIR-M  | Rubidio |
| B     | 5    | 71  | 26  | IIF    | Rubidio |
| B     | 6    | 77  | 14  | III    | Rubidio |
| C     | 1    | 57  | 29  | IIR-M  | Rubidio |
| C     | 2    | 66  | 27  | IIF    | Rubidio |
| C     | 3    | 72  | 8   | IIF    | Cesio   |
| C     | 4    | 53  | 17  | IIR-M  | Rubidio |
| C     | 5    | 59  | 19  | IIR    | Rubidio |
| D     | 1    | 61  | 2   | IIR    | Rubidio |
| D     | 2    | 63  | 1   | IIF    | Rubidio |
| D     | 3    | 45  | 21  | IIR    | Rubidio |
| D     | 4    | 67  | 6   | IIF    | Rubidio |
| D     | 6    | 75  | 18  | III    | Rubidio |
| E     | 1    | 69  | 3   | IIF    | Rubidio |
| E     | 2    | 73  | 10  | IIF    | Rubidio |
| E     | 3    | 50  | 5   | IIR-M  | Rubidio |
| E     | 4    | 51  | 20  | IIR    | Rubidio |
| E     | 5    | 76  | 23  | III    | Rubidio |
| E     | 6    | 47  | 22  | IIR    | Rubidio |

|   |   |    |    |       |         |
|---|---|----|----|-------|---------|
| F | 1 | 70 | 32 | IIF   | Rubidio |
| F | 2 | 55 | 15 | IIR-M | Rubidio |
| F | 3 | 68 | 9  | IIF   | Rubidio |
| F | 4 | 74 | 4  | III   | Rubidio |
| F | 6 | 43 | 13 | IIR   | Rubidio |

Tabla 5-2. Bloques satelitales II

### 5.1.2. Segmento de control

Este segmento está compuesto por cuatro subsistemas:

- Estación maestra de control
- Estación alternativa maestra de control
- Una red de cuatro antenas terrestres
- Una red globalmente distribuida de estaciones de monitoreo



Figura 5-2. Sistema de control GPS

#### 5.1.2.1. Estación maestra de control

Es el elemento principal y el más importante del segmento de control, ya que es la encargada de procesar todas las señales y datos recibidos desde las estaciones de monitoreo, para luego generar las señales que van a ser enviadas a los satélites por medio de las antenas de Tierra. Está ubicada en la base de la fuerza aérea Schriever, Colorado, Estados Unidos.

Las operaciones son mantenidas las 24 horas, los 7 días de la semana, a lo largo de todo el año, a cargo del 2do escuadrón de operaciones espaciales del gobierno de los EE. UU.

Sus funciones son:

- Monitoreo de rutina del estado de los satélites
- Mantenimiento de los satélites y resolución de anomalías en los subsistemas
- Soporte de puestas en servicio, desmantelamientos y eliminación de satélites
- Gestión de rendimiento de las señales del sistema para que cumplan con todos los estándares requeridos
- Subida a los satélites de los mensajes de navegación según los estándares
- Detección y respuesta a anomalías de las señales

Si la estación maestra queda fuera de servicio durante un cierto tiempo (el cual queda determinado por protocolos gubernamentales), las operaciones son trasladadas a

la estación alternativa, cuyas funciones son exactamente las mismas que las de la estación principal. Esta estación está ubicada en la base de la fuerza aérea Vandenberg, California, Estados Unidos.

La fiabilidad de las posiciones de los satélites y la sincronización del sistema temporal son dos factores clave para la precisión del cálculo en el posicionamiento terrestre, y no están exentos de sufrir alteraciones que produzcan cálculos erróneos. Como los satélites se desvían de su órbita teórica y los relojes se desincronizan por diversos motivos, la MCS es la encargada de hacer las correcciones necesarias, y posteriormente enviarlas por medio de las antenas terrestres hacia los satélites.

Por otro lado, también realiza las maniobras de reposicionamiento necesarias cuando algún satélite es desmantelado o bien, cuando otro nuevo ingresa a la constelación.



*Figura 5-3. Base aérea Schriever, Colorado*

#### **5.1.2.2. Estaciones de monitoreo**

Actualmente el segmento de control consta de 16 estaciones de monitoreo ubicadas en todo el planeta. Cada una de estas estaciones tienen la tarea de hacer el seguimiento de todos los satélites a los que tenga visibilidad en cada momento. Colectan las señales satelitales, las mediciones de fase y código y los mensajes de navegación para posteriormente enviar esos datos a la estación maestra de control. Son receptores GPS sofisticados, con relojes de alta estabilidad y materiales de primer nivel para así lograr la mayor precisión posible.



*Figura 5-4. Estación de monitoreo en la isla Diego García*

### 5.1.2.3. Antenas de Tierra

GPS utiliza una red de 11 antenas controladas por el gobierno de los Estados Unidos, de las cuales 4 son dedicadas exclusivamente a este sistema mientras que los 7 restantes pertenecen a una red de control de múltiples satélites de la Fuerza Aérea.

Sus funciones son las de proveer una interfaz de telemetría, seguimiento y comandos entre los satélites y la MCS, y de enviar toda la información hacia los satélites.



*Figura 5-5. Antenas en la base aérea Vandenberg, California*



*Figura 5-6. Antena en la base aérea de Thule, Groenlandia*

### 5.1.3. Segmento usuario

Este segmento está constituido por todos los receptores GPS que son utilizados por el usuario final para calcular su posición. Procesan las señales emitidas desde el segmento espacial y brindan la interfaz para el manejo y lectura de datos. Los satélites, al estar siempre en movimiento, deben ser rastreados continuamente por los receptores para así obtener sus señales.

Existen distintos tipos de receptores GPS dependiendo del uso para el cual fue fabricado, variando sus características, materiales, tamaño, etc., por lo que se hace difícil realizar una comparativa detallada de los diversos tipos. Algunos realizan el posicionamiento utilizando medidas de código, otros de fase, y existen también los que son capaces de hacer ambas operaciones. Las frecuencias que estos equipos pueden

manejar  
son una



también



característica importante, ya que algunos trabajan únicamente con señales L1, mientras que otros pueden hacerlo con L1 y L2 simultáneamente, y próximamente también entrará en juego la frecuencia L5.

## 6. Tipos de medidas y fuentes de error

Tal como se mencionó anteriormente, es necesario conocer las distancias entre el receptor y los satélites para poder calcular la posición buscada. Sin embargo, debido a los diversos errores que se introducen en las mediciones decimos que se calculan pseudodistancias. Existen dos tipos de medidas dependiendo del observable que se considere.

### 6.1. Medidas de código

Cada satélite tiene un código pseudoaleatorio único con el cual se modulan sus señales, por lo que cada receptor debe tener una copia de cada uno de los códigos para poder demodular la señal e identificar al satélite emisor.

El mensaje de navegación contiene el tiempo en el que se realiza la transmisión. Este tiempo es el que se obtiene de la lectura de su reloj a bordo.

Las medidas de código se basan en calcular el tiempo que tardó la señal en hacer su recorrido, es decir, desde que sale del centro de fase de la antena del satélite hasta que llega al centro de fase de la antena receptora. Para eso, cuando se recibe la señal, el receptor genera una copia del código, ya sea C/A o P, y la desplaza en el tiempo para luego realizar la función correlación entre ambas señales. El objetivo de este procedimiento es alinear las dos señales, lo cual ocurre en el instante en que la correlación alcanza su valor máximo.

Ese instante se interpreta como el tiempo de recepción, por lo que haciendo la resta entre ambos tiempos puede obtenerse  $\Delta t$ , que es el tiempo que la señal estuvo viajando el trayecto satélite-receptor. Como la longitud de onda de la señal y la velocidad de propagación es conocida, puede calcularse la distancia recorrida. Suponiendo una perfecta sincronización entre ambos relojes la situación queda como muestra la figura

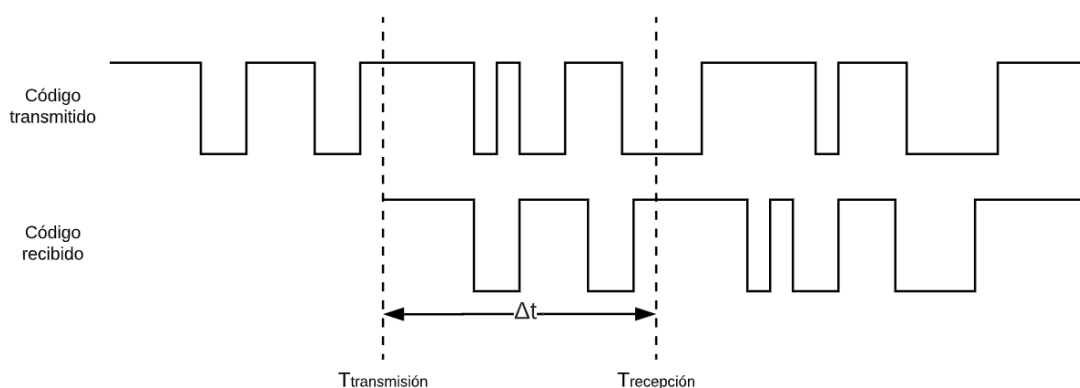


Figura 6-1. Medida de código

Donde, considerando la velocidad de la luz,  $c$ , la pseudodistancia  $R$ , es:

$$R = c * (t_r - t^s) = c * \Delta t$$

Sin embargo, la sincronización entre relojes nunca es perfecta debido a efectos atmosféricos, relativistas y por la estabilidad de sus osciladores. La consecuencia de esto se explica en el siguiente capítulo.

## 6.2. Medidas de fase

A diferencia de las medidas de código, en este tipo de medida lo que se intenta hacer es calcular la cantidad longitudes de onda  $\lambda$  que viajó la señal hasta llegar al receptor, y dado que  $\lambda$  es un dato conocido, podemos inferir la distancia que recorrió la señal.

Si la distancia satélite-receptor es un múltiplo de la longitud de onda, la misma estaría dada por  $d = N * \lambda$ , donde  $N$  es el número de ciclos que recorrió la onda.

Sin embargo, lo que el receptor realmente puede medir es el desfase  $\phi$  entre la onda recibida y la onda que el propio receptor genera. El problema radica en que no se puede determinar, en un primer instante, la cantidad entera  $N$  de longitudes de onda, dato necesario para calcular la distancia, que está dada por

$$d = \lambda * (N + \phi)$$

Este problema es llamado ambigüedad entera de ciclos de portadora.

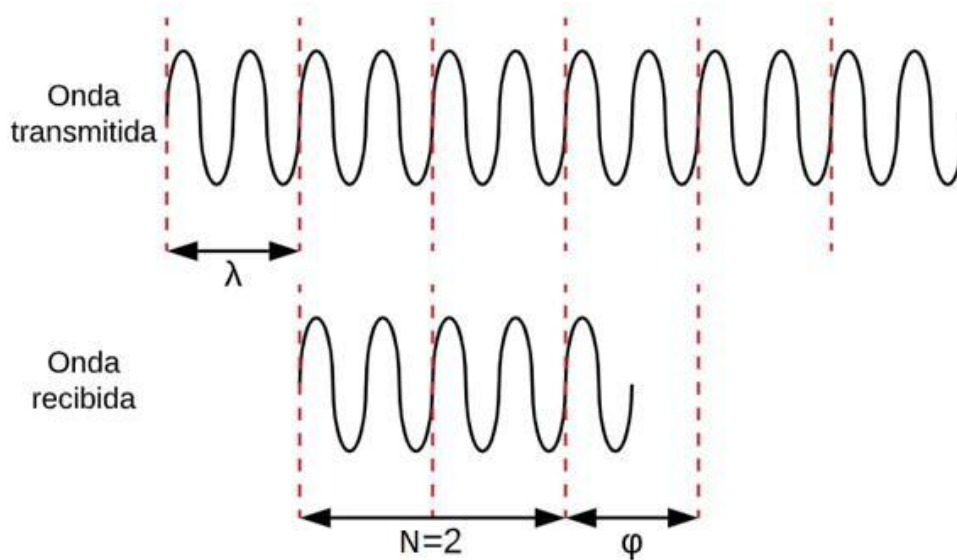


Figura 6-2. Medida de fase

## 6.3. Fuentes de error

En un sistema de posicionamiento satelital se generan errores que repercuten en la precisión al momento de obtener las coordenadas. Estos se originan, en su mayoría, en los satélites y en los receptores, pero también en la propagación de la señal propiamente dicha.

Dentro de los errores en el segmento satelital se encuentran los ocasionados por la desincronización y precisión de los relojes, como así también por efectos relativistas. Los parámetros orbitales, de igual manera, son causantes de mediciones erróneas.

Una vez que la señal es generada y transmitida por cada satélite, es necesario considerar los posibles errores causados por la propagación misma de la señal. Esta debe viajar por el vacío para luego ingresar a la atmósfera terrestre, donde primero pasa por la ionósfera y luego por la tropósfera, que son capas muy distintas respecto a su composición.

En el segmento de recepción, los relojes de los receptores tienen los mismos problemas que los del segmento satelital e incluso generan errores más groseros debido a que la calidad de los primeros es considerablemente menor. Los retardos por el instrumental también son considerados dentro de este segmento.

En la siguiente tabla se resumen los errores respecto a diversos factores

|             |                              |
|-------------|------------------------------|
| Satélite    | Errores de reloj             |
|             | Errores orbitales            |
|             | Errores relativistas         |
| Propagación | Retardo Ionosférico          |
|             | Retardo Troposférico         |
|             | Propagación multicamino      |
|             | Efectos atmosféricos         |
| Receptor    | Errores de reloj             |
|             | Retardos por el instrumental |
|             | Perdida de ciclo             |

Tabla 6-1. Fuentes de error

Los errores de reloj y del instrumental son considerados errores sistemáticos, mientras que los errores de propagación se consideran aleatorios, ya que son causados por factores externos que no dependen del sistema satelital ni del sistema receptor.

### 6.3.1. Errores en el segmento satelital

#### 6.3.1.1. A causa de los parámetros orbitales

Para que un receptor pueda calcular su distancia a un determinado satélite tiene que conocer la posición de este último. Esto lo hace por medio de las efemérides que son transmitidas en el mensaje de navegación de cada satélite.

El problema radica en que las efemérides son transmitidas cada cierto intervalo de tiempo, y durante ese lapso la posición de cada satélite se calcula extrapolando los datos recibidos, por lo que en esos instantes de tiempo los satélites se pueden desviar de la órbita teórica calculada a causa de ciertos factores, entre los cuales los más importantes son:

- Variación del campo gravitatorio terrestre
- Fuerzas gravitatorias del Sol y la Luna
- Efecto tercer cuerpo
- Redistribución de masas

#### 6.3.1.2. A causa de los relojes

Este tipo de error tiene dos componentes que lo caracterizan. El primero es la desincronización que se produce entre el reloj satelital respecto al tiempo GPS. Estos

osciladores tienen una gran estabilidad, del orden de  $10^{-12}$ - $10^{-13}$ , lo que podría causar errores milimétricos en la distancia ( $3 \times 10^8 \times 10^{-12} = 0.0003$  m). El problema es que estos pequeños desfases pueden ocasionar irregularidades en la marcha del reloj y así llegar a cometer errores muchos más grandes en lo que a distancia respecta. Cabe aclarar que un error de 1 ms es equivalente a un error de 300 km en distancia. Este error se llama de sincronización u offset del reloj,  $dt$ .

La segunda componente es el desfase que se produce entre los relojes satelitales y los relojes de los receptores. A causa de los efectos relativistas, aunque en un tiempo inicial ambos relojes estén sincronizados, van a tender a desincronizarse. Esta desincronización ocasionará errores de tiempo, lo a que a su vez se traducirá en errores de distancia.

Matemáticamente se puede representar como:

$$\delta t_s = dt + \delta t_r$$

Siendo el primer y segundo término, la primer y segunda componente antes mencionadas, respectivamente.

#### **6.3.1.3. Errores relativistas**

Por teoría de relatividad general, el ritmo de oscilación de dos relojes iguales pero ubicados uno en la Tierra y otro en un satélite, (aproximadamente a 20000 km de distancia) van a ser distintos, es decir, que van a presentar una deriva. Esto ocurre por el efecto del potencial gravitatorio terrestre y por la diferencia de velocidad relativa que presentan.

Estos errores son muy pequeños, y pueden descomponerse en dos componentes. La primera es debida a la relatividad general (potencial gravitatorio terrestre), que nos plantea que a mayor distancia de la superficie terrestre (menor gravedad) el tiempo transcurre más lentamente. Al ocurrir esto, la frecuencia del oscilador en el satélite tenderá a incrementarse, por lo cual, la solución a este problema es, directamente desde fábrica, disminuir la frecuencia fundamental del oscilador de los relojes satelitales.

La segunda componente es debida a la diferencia de velocidades relativas entre el satélite y el receptor, cuyo origen está presente en la excentricidad de las órbitas. Este valor es periódico y se corrige por medio del software incluido en los receptores terrestres.

#### **6.3.2. Errores en la propagación**

Estos errores son debidos a que las ondas electromagnéticas tienen que atravesar distintas capas de la atmosfera hasta llegar al receptor. Estas capas están compuestas por diferentes partículas, motivo por el cual las ondas se desvían y el cálculo de distancia se distorsiona.

Por otra parte, estos efectos afectan en menor medida cuando el recorrido de la onda tiende a ser vertical que cuando es horizontal, por lo que se establece un ángulo, en términos de altura hacia el horizonte, en el cual el receptor sabe que no debe tomar la

señal de ese satélite con el fin de evitar grandes errores. Este ángulo es por lo general entre 10° y 15°.

| Satélite respecto a la distancia del centro de la Tierra |              |                  |                        |
|----------------------------------------------------------|--------------|------------------|------------------------|
| Capa                                                     | Altitud (km) | Medio dispersivo | Factores de error      |
| Vacío                                                    | Más de 1000  | No               | Ninguno                |
| Ionósfera                                                | 80 a 1000    | Sí               | Iones                  |
|                                                          |              |                  | Sol                    |
|                                                          |              |                  | Latitud geográfica     |
|                                                          |              |                  | Elevación del satélite |
| Troposfera                                               | 0 a 80       | No               | Presión                |
|                                                          |              |                  | Temperatura            |
|                                                          |              |                  | Humedad                |

Tabla 6-2. Errores en la propagación

- Vacío: es la zona que se encuentra superados los 1000 km de altitud. Aquí el retardo es inexistente y no se produce ningún tipo de error.
- Ionósfera: es la capa comprendida entre los 80 y 1000 km de altitud. La velocidad de propagación de una onda electromagnética es dependiente de la frecuencia de esta, por lo que se dice que es un medio dispersivo. Esto ocurre a causa de que las distintas radiaciones (solares, ultravioletas y otras) ionizan parte de las moléculas presentes en esta zona, liberando electrones. La velocidad de propagación resultante afectará de distinta manera a las mediciones de fase y código, sufriendo adelantos o atrasos según sea el caso. Cuando la onda atraviesa la ionósfera, su velocidad de fase aumenta por lo que mide menor distancia, pero en el caso de los códigos su velocidad disminuye, midiendo mayor distancia. El error es proporcional a la cantidad de electrones libres presentes en un determinado momento, lo cual depende de varios factores, como por ejemplo el efecto solar, si es de día o noche, la latitud geográfica donde se hace la medición, la elevación del satélite, la época del año, entre otros.
- Tropósfera: a efectos de propagación de señales, se considera tropósfera a la capa de la atmosfera que contiene a la tropósfera (0 a 10km), a la estratósfera (10 a 50km) y a la mesósfera (50 a 80km). No es un medio dispersivo, por lo que la frecuencia de la señal no tiene injerencia en su velocidad de propagación. El retardo que ocurre en esta zona varía en función del ángulo de elevación del satélite, de la altitud del receptor, de la presión atmosférica, de la temperatura y de la presión de vapor de agua.

### 6.3.3. Errores en el receptor

#### 6.3.3.1. A causa de los relojes

Al igual que se mencionó en el caso de los relojes satelitales, estos también presentan errores de sincronización respecto al tiempo GPS, con el agravante de que en

su gran mayoría la estabilidad de los osciladores es considerablemente menor, del orden de los  $10^{-8}$  segundos, lo que representa un error en distancia de 1 metro.

#### **6.3.3.2.            *A causa del instrumental***

Son retardos ocasionados por las antenas receptoras, cables, filtros y electrónica utilizada en el receptor. Son comunes a cualquier medición hacia cualquier satélite y son casi imperceptibles, pero se los puede eliminar fácilmente teniendo visión hacia 4 satélites o por simples diferencias.

#### **6.3.3.3.            *Pérdidas de ciclo***

Esto ocurre sólo en los cálculos sobre mediciones de fase, y es cuando el receptor pierde visión del satélite sobre el que está enganchado.

## 7. Métodos de posicionamiento GNSS

Para poder explicar con detalle las características del sistema GPS-RTK es necesario hacer una breve caracterización de las técnicas de observación que existen, dependiendo de los parámetros que se tengan en cuenta. Hay diversas formas de clasificación, pero la más común y que abarca la mayoría de los aspectos es la siguiente:

- Según el tipo de solución
  - Posicionamiento absoluto, donde se obtienen coordenadas de un punto aislado (X, Y, Z)
  - Posicionamiento relativo, donde se obtiene un vector que representa las coordenadas de un punto respecto a otro (dX, dY, dZ)
- Según el observable
  - Código
  - Fase
- Según la movilidad del receptor
  - Estático, donde el receptor permanece quieto durante toda la observación.
  - Cinemático, donde el receptor permanece en continuo movimiento durante la observación.
  - Híbrido, que combina los dos anteriores.
- Según la disponibilidad de la solución
  - En tiempo real, donde se calculan las coordenadas o el vector línea base en el mismo momento de la observación
  - Postproceso, donde se obtienen luego de un cierto período de tiempo de observación.

### 7.1. Posicionamiento absoluto

Es el método más simple, en el cual solo es necesario un receptor. Consiste en encontrar las coordenadas de la posición actual del equipo terrestre mediante la observación de un mínimo de 4 satélites a través del cálculo de pseudodistancias, utilizando observables de código o de fase. Con el uso de medidas de fase la precisión es mucho mayor que con medidas de código, pero esto requiere más procesamiento y tiempo de observación, sumado a que no todos los equipos receptores cuentan con esta funcionalidad.

Por lo general este método es el que utilizan los equipos colocados en automóviles, los que se usan en deportes y cualquier otro uso que no requiera de mucha precisión y que además se necesite que sean pequeños y portátiles.

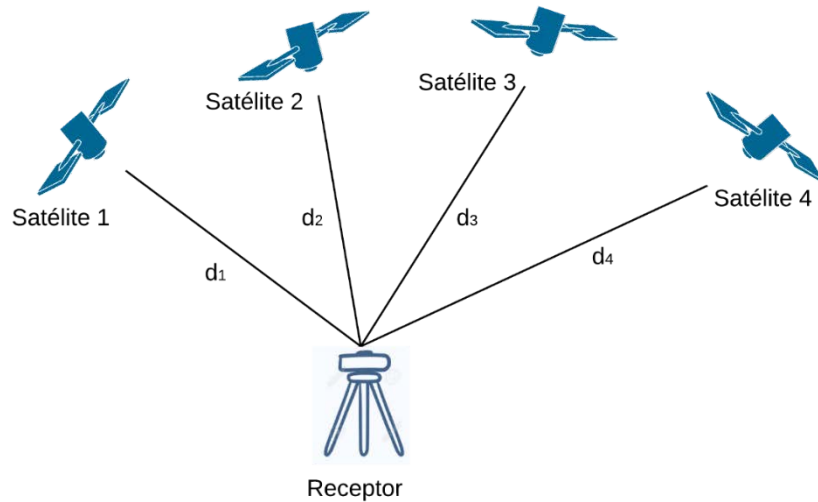


Figura 7-1. Posicionamiento absoluto

## 7.2. Posicionamiento relativo

Para este tipo de posicionamiento son necesarios por lo menos dos receptores, que deben hacer observaciones simultáneas, por lo menos también, hacia dos mismos satélites. Mediante este método se eliminan muchos de los errores sistemáticos y aleatorios mencionados con anterioridad, por lo que brinda más precisión en la obtención de coordenadas. Pueden trabajarse tanto con medidas de fase como con medidas de código.

Para realizar el posicionamiento, uno de los receptores tiene que estar ubicado en un lugar fijo con coordenadas conocidas, mientras que el otro es el que mantiene como incógnita su ubicación.

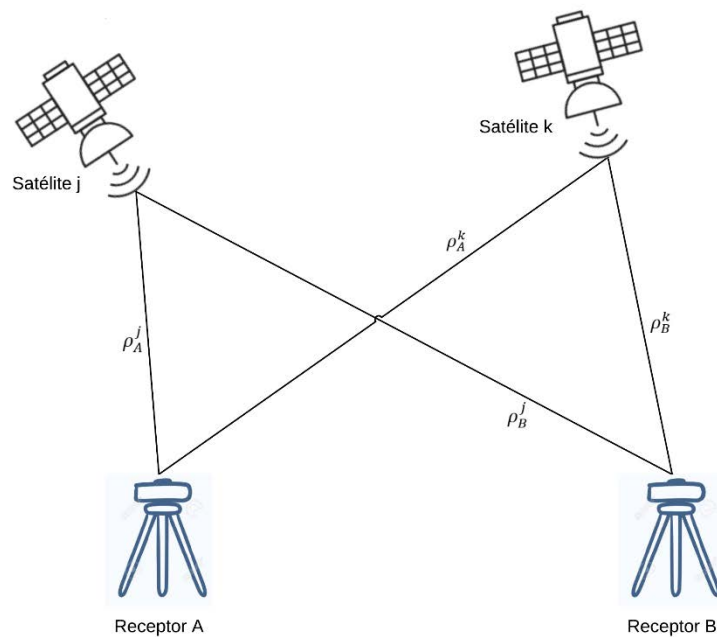


Figura 7-2. Posicionamiento relativo

Supongamos que el receptor fijo con coordenadas conocidas es el A. Cuando calcule su posición en base a las señales GPS recibidas podrá comparar las coordenadas calculadas con las coordenadas reales, pudiendo así inferir los errores que se produjeron. El receptor B también realizará su posicionamiento y obtendrá sus coordenadas, pero conociendo los errores que dedujo el receptor A podrá hacer las correcciones pertinentes para conseguir una posición con más exactitud.

## 8. Observables GPS

Los observables del sistema son las señales a partir de las cuales el receptor puede calcular su distancia respecto al satélite generador de la señal.

Hay dos tipos de observables, que se diferencian respecto al parámetro observado para realizar dicho cálculo.

- Observables de tiempo
  - Código C/A, modulado únicamente sobre portadora L1
  - Código P, modulado sobre portadora L1
  - Código P, modulado sobre portadora L2
- Observables de diferencia de fases
  - Portadora L1 (1575,42 MHz)
  - Portadora L2 (1227,60 MHz)

El código P está siempre encriptado y es utilizado para uso militar, por lo que para uso civil solo disponemos del código C/A. Por tal motivo, éste trabajo se enfocará en dicho código y en la portadora L1, ya que L2 no posee información que nos pueda servir.

El objetivo principal del sistema GPS es determinar la posición de un receptor sobre cualquier punto, para lo cual, el desafío principal del segmento usuario es calcular su distancia respecto a una serie de satélites. En la práctica, esta medición no puede ser realizada directamente a causa de errores que se presentan al momento de esta.

Lo que un receptor puede realmente medir son *pseudodistancias*, en cuyo resultado se incluye la distancia real y los diversos errores de medición.

### 8.1. Observables de tiempo

Cuando se hacen medidas de código, el observable en cuestión es el tiempo que tarda la señal en viajar desde el emisor al receptor.

Anteriormente se mostró cómo se realiza el cálculo sin tener en cuenta el desfase entre los relojes. Ahora, considerando el caso en que los relojes del satélite y del receptor estén desincronizados, los verdaderos tiempos del sistema están dados por

$$t^s(GPS) = t^s - \delta^s$$

$$t_r(GPS) = t_r - \delta_r$$

Donde  $t^s$  es el tiempo leído del reloj del satélite al momento de transmisión y  $t_r$  es el tiempo leído por el receptor cuando recibe la señal. Pero, como los relojes no están en perfecta sincronía, sería erróneo utilizar estos datos para calcular el valor  $\Delta t$  que utilizamos para describir la diferencia entre los tiempos de emisión y recepción de la señal.

De esta manera se introducen dos términos,  $\delta^s$  y  $\delta_r$ , que son las desviaciones respecto al sistema de tiempo GPS. Por consiguiente,  $\Delta t$  ahora está dado por:

$$\Delta t = t_r - t^s = [t_r(GPS) + \delta_r] - [t^s(GPS) + \delta^s] = \Delta t(GPS) + \Delta\delta$$

Donde

- $\Delta t(GPS) = [t_r(GPS) - t^s(GPS)]$
- $\Delta\delta = [\delta_r - \delta^s]$

Con estos nuevos datos y reordenando la ecuación de pseudodistancias del capítulo 6, se tiene que

$$R = c * \Delta t = c * [\Delta t(GPS) + \Delta\delta] = c * \Delta t(GPS) + c * \Delta\delta$$

Al ser  $\Delta t(GPS)$  la diferencia, en principio sin errores, de los tiempos de transmisión y recepción, podemos considerar al término  $c * \Delta t(GPS)$  como la distancia real satélite-receptor, la cual se denota con la letra  $\rho$ .

$$R = c * \Delta t = c * [\Delta t(GPS) + \Delta\delta] = \rho + c * \Delta\delta$$

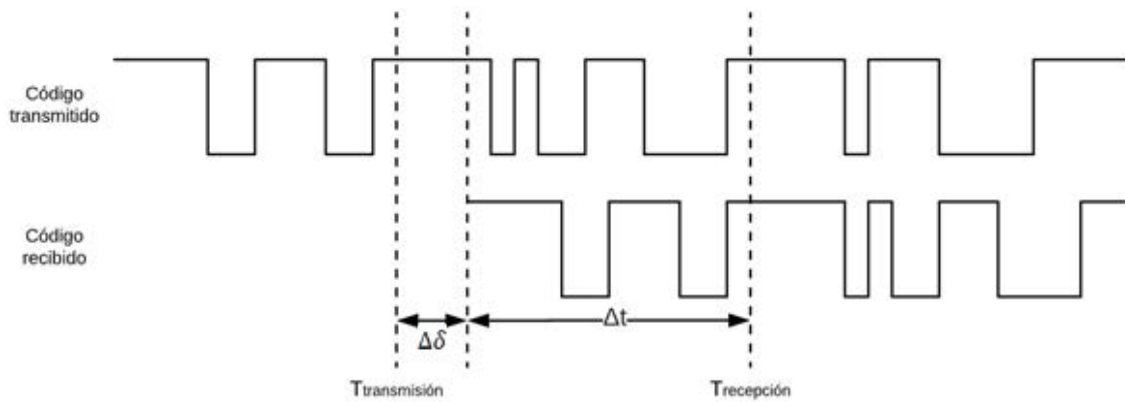


Figura 8-1. Observable de código

El término  $c * \Delta\delta$  es el error debido a la desviación entre relojes. Pero, sumado a esto hay que considerar los errores debidos al paso de la señal por la atmósfera, más precisamente por la ionósfera y la tropósfera, los cuales son denotados por  $\Delta^{iono}$  y  $\Delta^{tropo}$  respectivamente. También hay que incluir los errores por propagación multicamino,  $\Delta_m$  y otros errores aleatorios,  $\varepsilon_p$ .

Resumiendo

$$R = \rho + c * \Delta\delta + \Delta^{iono} + \Delta^{tropo} + \Delta_m + \varepsilon_p$$

## 8.2. Observables de diferencia de fase

Si conocemos la frecuencia de una señal, por consiguiente, también conocemos su longitud de onda. De esta manera se sabe que la distancia que recorre una onda puede ser inferida si se conoce la cantidad de ciclos que viajó. Si ésta distancia es un múltiplo de la longitud de onda, la expresión resultante sería simplemente

$$R = N * \lambda$$

Donde

- R es la pseudodistancia
- $\lambda$  es la longitud de onda
- N son los ciclos enteros de la señal

Pero, generalizando, se debe tener en cuenta que la distancia a medir está compuesta por los ciclos enteros y también por una parte no entera, a la que llamamos desfase de la señal.

Particularmente para el caso de mediciones de fase, lo que se hace es medir el desfase entre la onda recibida y su réplica generada en el receptor, y, conociendo la cantidad de ciclos enteros que recorrió la señal, poder calcular la distancia satélite-receptor. Matemáticamente

$$R = \lambda(N + \varphi)$$

Donde  $\varphi$  es el desfase entre ambas señales.

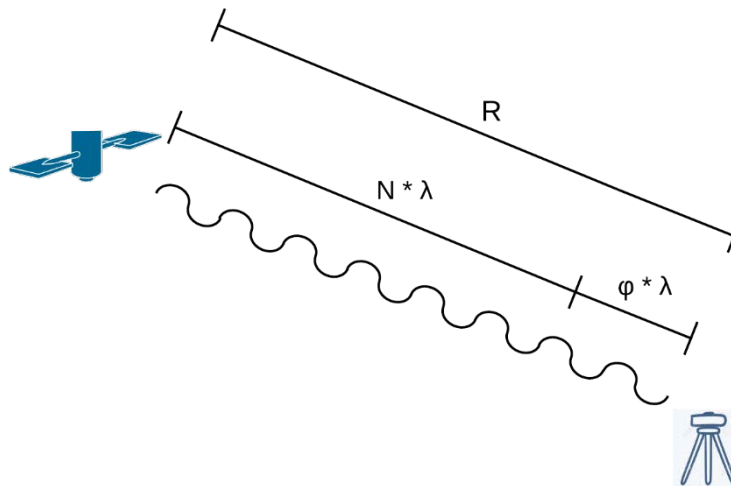


Figura 8-2. Observable de fase absoluto

En la práctica conocer el número N no es tarea sencilla y requiere de algunas técnicas que se verán más adelante, pero lo que sí se puede medir fácilmente es  $\varphi$  ya que la frecuencia de operación es un dato conocido.

El observable para este tipo de medida es el desfase entre la onda recibida y la generada en el receptor, y para poder hacer ese cálculo es necesario sincronizar la señal del satélite con la del receptor. Esta sincronización se hace de la misma manera que en las mediciones de código, haciendo la correlación entre ambas señales y encontrando el tiempo de máximo valor. A partir de ese momento se produce lo que se llama el enganche de la señal, que consiste en una serie de cálculos que realiza el receptor cuyos resultados dependen de resultados anteriores, para lo cual es indispensable que nunca se corte la recepción de la señal.

En un tiempo  $t_0$ , que es cuando se produce el enganche, la distancia inferida queda expresada por dos términos, el primero en función del desfase medido y el segundo por los ciclos enteros. De esta manera

$$\phi_0 = \left( \frac{\varphi_0}{2\pi} \right) * \lambda + N_0 * \lambda$$

Donde

- $\phi_0$  es la distancia satélite-receptor
- $\left( \frac{\varphi_0}{2\pi} \right) * \lambda$  es la longitud del desfase. Es un valor medido
- $N_0$  es la cantidad de ciclos enteros que viajó la onda, mientras que  $N_0 * \lambda$  es la expresión en términos de distancia. Es un valor no medido.

El receptor usa un contador entre dos tiempos para poder medir el desfase  $\phi_0$  y a partir del momento de su cálculo también utiliza un contador de ciclos enteros, haciendo que  $N_0$  quede como una constante y midiendo una determinada cantidad de ciclos enteros ahora llamados  $N_i$ .

Para un instante seguido de tiempo, que llamaremos  $t_1$ , la distancia real satélite-receptor  $\rho_1$  vendrá dada por la siguiente expresión en función de tres términos:

$$\rho_1 = \left( \frac{\varphi_1}{2\pi} \right) * \lambda + N_1 * \lambda + N_0 * \lambda = \phi_1 + N_0 * \lambda$$

Así, mientras se mantenga el enganche de la señal, es posible medir el desfase y los ciclos enteros desde un momento determinado. Pero el término que incluye la ambigüedad  $N_0$  que por comodidad se llamará simplemente  $N$ , no desaparece y serán necesarias otras técnicas para poder resolverla.

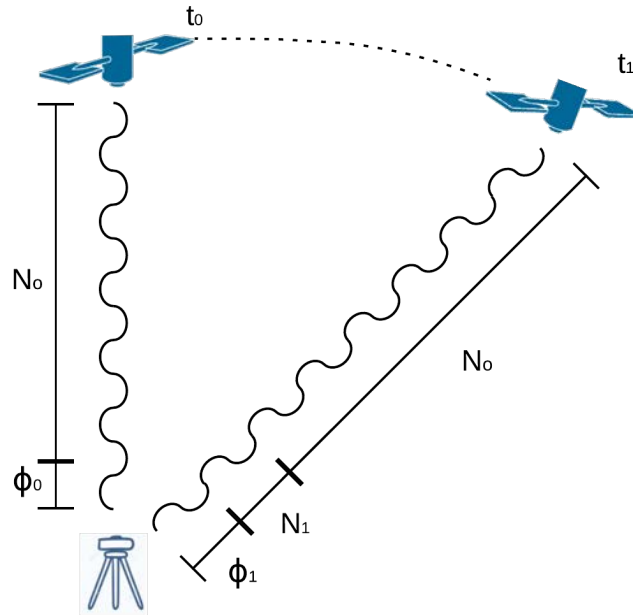


Figura 8-3. Observable de fase relativo

Al igual que en medidas de código, la señal se verá afectada por diversos errores por lo que la ecuación general que representa a la pseudodistancia será, en unidades lineales:

$$\phi = \rho + c * \Delta\delta + N * \lambda + \Delta^{tropo} - \Delta^{iono} + \Delta_m + \varepsilon_p$$

Y en unidades de ciclo, como ángulo:

$$\Phi = \frac{\rho}{\lambda} + \frac{c*\Delta\delta}{\lambda} + N + \frac{\Delta^{tropo}}{\lambda} - \frac{\Delta^{iono}}{\lambda} + \Delta_m + \varepsilon_p$$

## 9. Señales GPS

Todos los satélites que forman parte de la constelación tienen un reloj atómico fabricado ya sea de cesio o de rubidio. Estos son relojes de muy alta estabilidad y oscilan a una frecuencia fundamental  $f_0$  de 10,23 MHz, a partir de la cual se generan todas las señales del sistema.

Previamente se definirá el tipo de modulación que se utiliza y qué es un código pseudoaleatorio, para luego explicar los fundamentos de las portadoras L1 y L2, como así también los códigos C/A y P, y el mensaje de navegación. Por último, se comentará brevemente el estado de otras nuevas señales que actualmente no están 100% operativas.

La primera pregunta que debemos hacernos es cómo hace el sistema para funcionar si todos los satélites transmiten portadoras en las mismas dos frecuencias. Para ello introducimos el concepto de acceso múltiple por división de código (CDMA, code division multiple access).

### 9.1. CDMA y señales de espectro ensanchado

CDMA es una técnica que permite la transmisión en simultáneo de una cierta cantidad de emisores utilizando la misma banda de frecuencia. Para poder lograrlo sin que la interferencia de cada emisor influya sobre otro, se asigna a cada uno un código único, que en el caso de GPS son los llamados códigos pseudoaleatorios.

A su vez, GPS utiliza señales de espectro ensanchado, que es una técnica en la que la secuencia de datos a transmitir se modifica para que ocupe un ancho de banda mucho mayor que el necesario para hacerlo originalmente. Al principio esto podría parecer absurdo, pero veremos que tiene grandes ventajas en lo que a GPS le compete.

Se dice que ambas técnicas trabajan en conjunto porque para generar la señal de espectro ensanchado es necesario utilizar un código, en este caso pseudoaleatorio, para poder lograr el ensanchamiento deseado, por lo que se podría decir que estamos en presencia de un sistema CDMA.

En el extremo emisor lo que se hace es multiplicar, a través de la operación XOR, el tren de datos que se desea transmitir por la secuencia pseudoaleatoria, dando lugar en ese mismo momento al ensanchamiento de la señal debido a que el código pseudoaleatorio es de período mucho menor al período de la señal de datos. Luego, se realiza una modulación analógica para su transmisión.

En el extremo receptor, lo primero es demodular la señal analógica para obtener un tren de bits. Luego, volviendo a hacer la misma operación XOR se obtiene la señal de datos original.

Esto es posible únicamente si el receptor tiene una copia exacta de la secuencia pseudoaleatoria que utilizó el emisor, de lo contrario el resultado de la operación XOR en el receptor sería percibido como ruido.

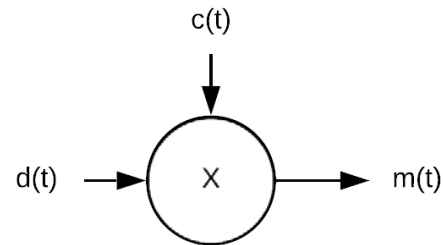
Matemáticamente, el proceso digital de espectro ensanchado se traduce de la siguiente manera

- En el transmisor:

$$m(t) = d(t) * c(t)$$

Donde

- $m(t)$  es el mensaje por transmitir
- $d(t)$  son los bits de información
- $c(t)$  es el código pseudoaleatorio o pseudoruido



Gráficamente, en términos de potencia espectral

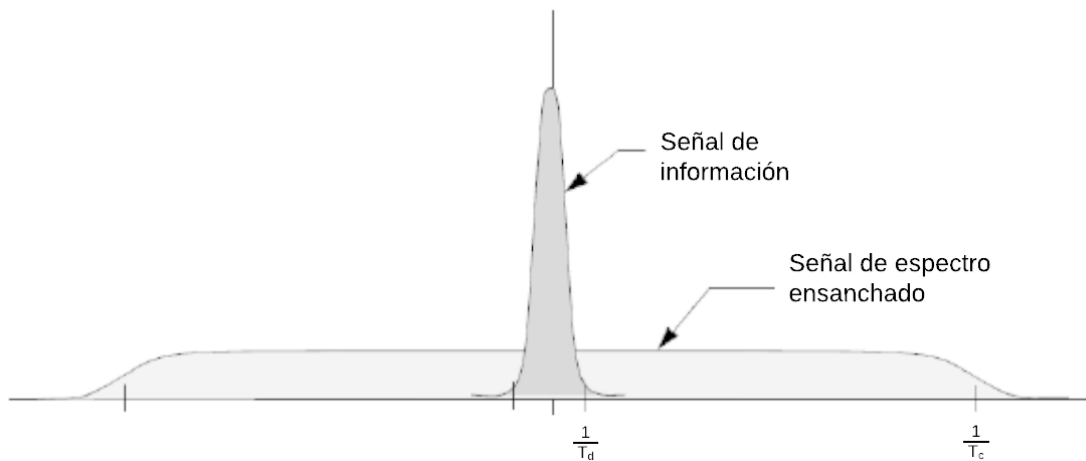


Figura 9-2. CDMA II

Donde

- $T_d$  es el período de la señal de información
- $T_c$  es el período del código pseudoaleatorio

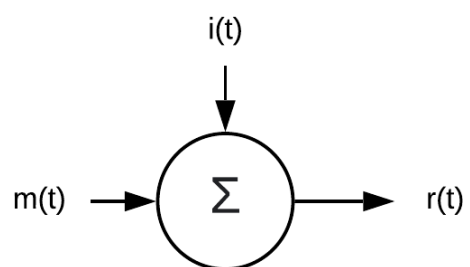
- Una vez transmitida la señal, en el canal se ve afectada por ruido e interferencias por lo que tenemos que

$$r(t) = m(t) + i(t)$$

Donde

$r(t)$  es la señal resultante

$i(t)$  son señales aditivas no deseadas



Como se mencionó anteriormente, una vez que la señal llega al receptor, es necesario que sea multiplicada nuevamente por una réplica del código pseudoaleatorio, dando lugar a la siguiente ecuación

$$z(t) = r(t) * c(t)$$

Reemplazando

$$z(t) = [m(t) + i(t)] * c(t)$$

$$z(t) = m(t) * c(t) + i(t) * c(t)$$

$$z(t) = d(t) * c(t) + i(t) * c(t)$$

$$z(t) = d(t) + i(t) * c(t)$$

Vemos que la señal resultante  $z(t)$  en el receptor está compuesta por la señal de datos original más una componente llamada interferencia de espectro ensanchado, ya que está compuesta de interferencias inherentes al sistema, multiplicada por el pseudoruido.

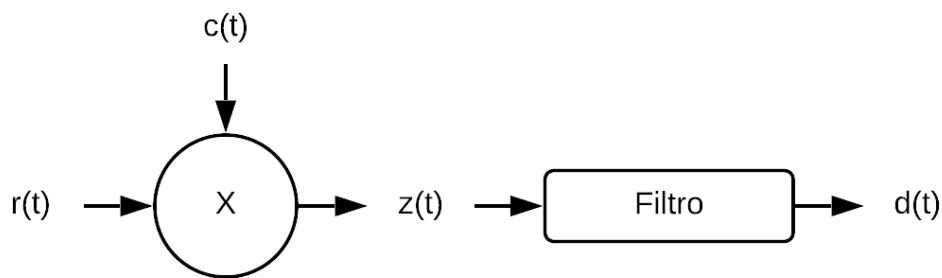


Figura 9-4. CDMA IV

Para obtener la única señal que nos interesa se utiliza un filtro de banda angosta como se muestra en la siguiente imagen.

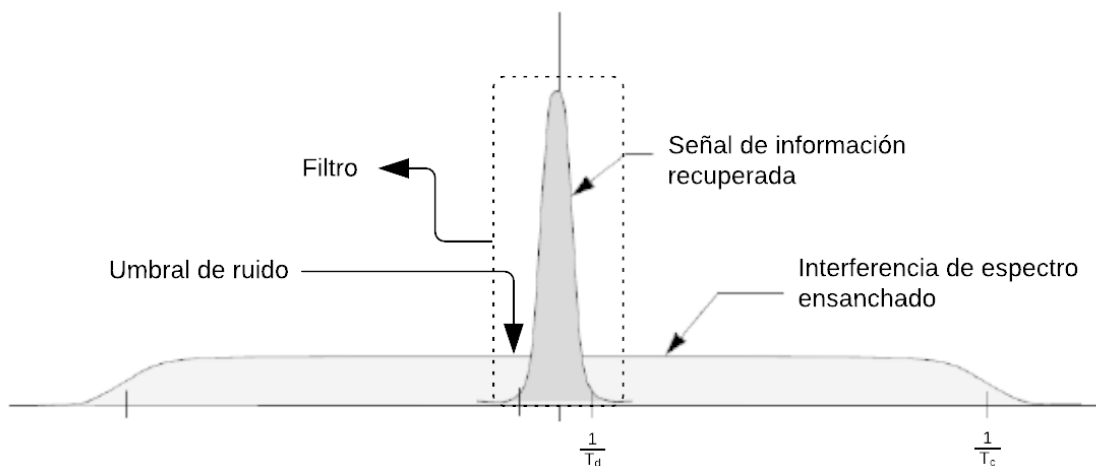


Figura 9-5. CDMA V

A continuación, se muestra el ejemplo de una señal con un cierto mensaje y un determinado pseudoruido, y cómo es el caso en el que el receptor utilice otro código pseudoaleatorio al momento de demodular la señal.

- Modulación y transmisión de una señal BPSK

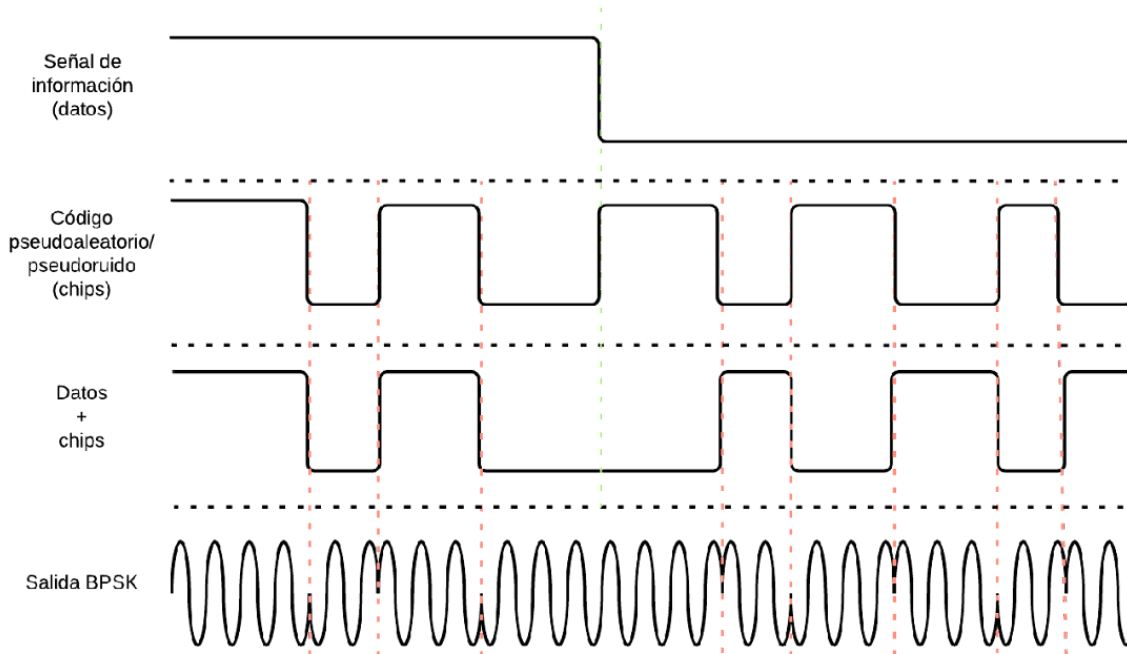


*Figura 9-6. Modulación BPSK con CDMA*

- Recepción y demodulación de una señal con un código correcto

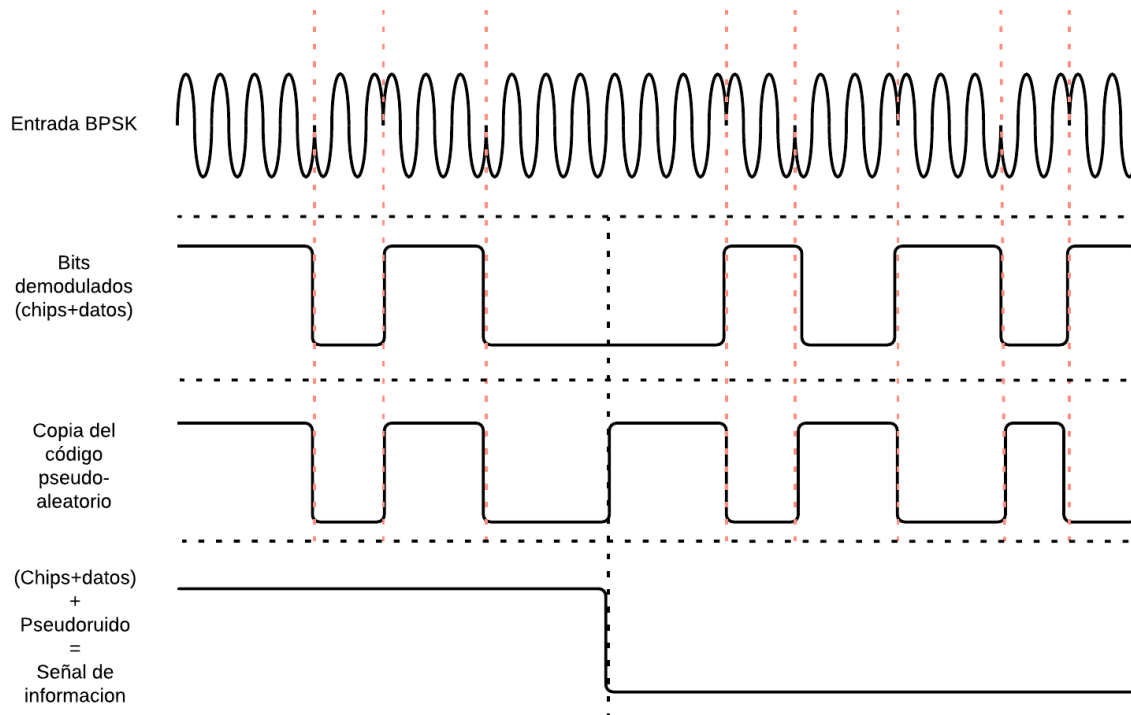


Figura 9-7. Demodulación con código correcto

- Recepción y demodulación de una señal con un código incorrecto

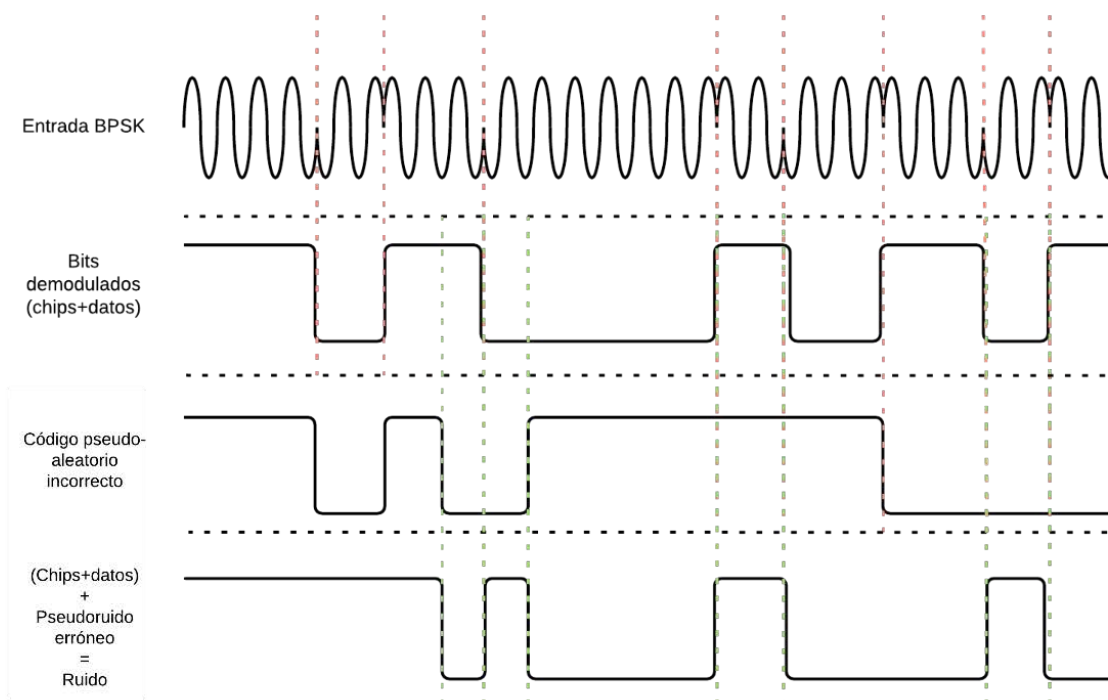


Figura 9-8. Demodulación con código incorrecto

## 9.2. Códigos pseudoaleatorios

También llamados pseudoruido, son una cadena de bits generados de forma determinística, pero con propiedades similares al ruido blanco si el receptor no conoce la cadena en cuestión. Esto es así porque la función autocorrelación de estos códigos es muy similar a la función autocorrelación del ruido blanco.

No existe un único código pseudoaleatorio, sino que pueden ser diseñados según ciertos criterios por medio de registros de desplazamiento retroalimentados, de longitud finita  $n$ , pudiendo alcanzar una longitud máxima  $N=2^n-1$ . Esto significa que las secuencias resultantes se repetirán luego de un periodo  $T=1/N$ .

Las propiedades para que cualquier cadena de bits periódica tenga la apariencia de ser aleatoria son:

1. Dentro de un periodo la cantidad de números unos y ceros presentes en el código debe diferir en un elemento.
2. Dentro de un periodo, llamaremos cadena a la secuencia de dígitos iguales consecutivos. Se desea que, en cada periodo, la mitad de las cadenas sean de longitud 1, un cuarto de longitud 2, un octavo de longitud 3 y así sucesivamente.
3. Se busca que la correlación de un código con cualquier otra secuencia sea mínima, y que dicha correlación sea máxima únicamente cuando se compara el código consigo mismo. Estas diferencias de valores de correlación se incrementarán proporcionalmente al valor de  $N$ .

En el caso de GPS, estos códigos principalmente se utilizan para que los receptores puedan identificar a cada satélite y para realizar el cálculo de distancia hacia cada uno.

### 9.2.1. Código C/A

Los códigos de adquisición común (Coarse Acquisition, C/A) son secuencias de pseudoruido, PRN. Se modulan únicamente en la portadora  $L1$  y son libres para cualquier tipo de uso. Tienen una longitud de 1023 bits y una frecuencia de 1,023 MHz, es decir, se repite cada 1 milisegundo. Existen 32 códigos C/A diferentes que son usados en cada satélite para que los receptores puedan distinguir el origen de cada señal.

En particular, para la generación de estos códigos, se utilizan dos registros de desplazamiento de 10 bits cada uno, configurados en paralelo de manera tal que para obtener un chip del código suma la salida de ambos. El vector de iniciación para ambos registros es 1111111111.

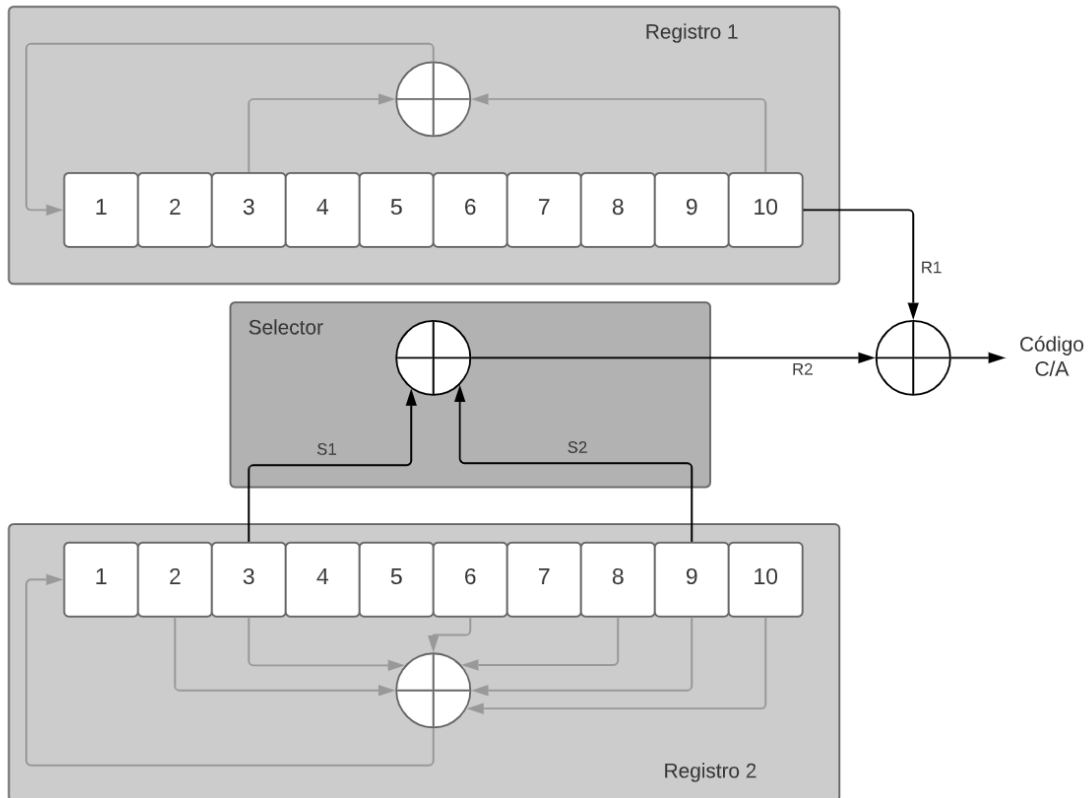


Figura 9-9. Obtención de código C/A

La retroalimentación en el registro 1 se da reemplazando el valor de la celda 1 con el resultado de la operación XOR entre las celdas 3 y 10, mientras que su salida R1 la da el valor de la celda 10. En paralelo, la retroalimentación del registro 2 se obtiene reemplazando el valor de la celda 1 por el resultado de la operación XOR entre las celdas 2, 3, 6, 8, 9 y 10.

El selector tiene un papel muy importante en la generación del código, ya que es el encargado de seleccionar dos celdas distintas, cuyos valores se suman para generar la salida R2. La elección de estas dos celdas es propia de cada satélite y se mantiene fija para cada uno de ellos. Esta información es conocida por todos, motivo por el cual se puede distinguir al emisor de cada una de las señales.

Finalmente, los valores R1 y R2 se suman, obteniendo así un chip del código C/A.

Al utilizar  $n=10$ , la longitud máxima del código es de  $N=2^{10}-1=1023$  chips. Esta secuencia se repite cada 1 ms, lo que nos da la frecuencia de 1,023Mchips/s. Luego, este código es el que modula a la portadora L1 de 1575,42 MHz.

### 9.2.2. Código P

El código preciso es también una secuencia pseudoaleatoria. Se modula tanto en la portadora L1, desfasado  $90^\circ$  respecto al código C/A, como en L2. La longitud de cada uno de estos es de  $2,35 \times 10^{14}$  dígitos binarios y su frecuencia es de 10,23 MHz, es decir, se repite diez veces más rápido que el código C/A. Sin embargo, se tardarían aproximadamente 266 días en transmitir el código entero, por lo cual, en vez de asignar

un código P completo a cada satélite, lo que se hace es asignarle a cada uno un fragmento equivalente a 7 días del código. Esta porción de código es la que se utiliza para la identificación de las señales de cada satélite y se reinicia cada domingo a las 0 horas UTC.

Se genera por medio del uso de 4 registros de desplazamiento, de 12 bits cada uno. Cada registro tiene su polinomio característico y su vector de iniciación. Cada chip del código P surge de la operación XOR entre un bit proveniente de la cadena X1 y otro bit de la cadena X2. A diferencia del código C/A donde había un selector de celdas que era característico para cada satélite, en la generación del código P lo que caracteriza a cada uno de los satélites y cuyo dato es conocido por todos, es un retraso  $i$  en el tren de bits de la cadena X2 que luego se suma a X1. Este retraso se produce intencionalmente en una cierta cantidad  $i$  de bits, donde  $1 \leq i \leq 37$ , lo cual genera una secuencia distinta para cada satélite.

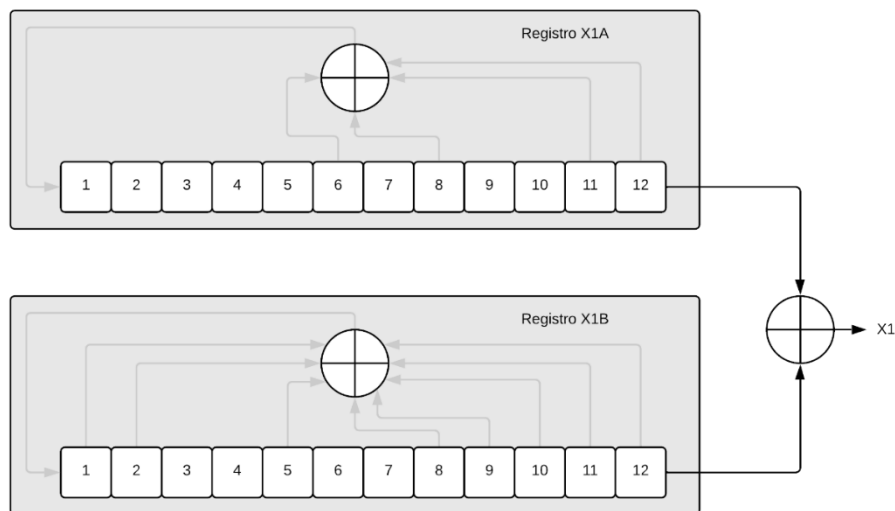


Figura 9-10. Obtención de X1



Figura 9-11. Obtención de X2

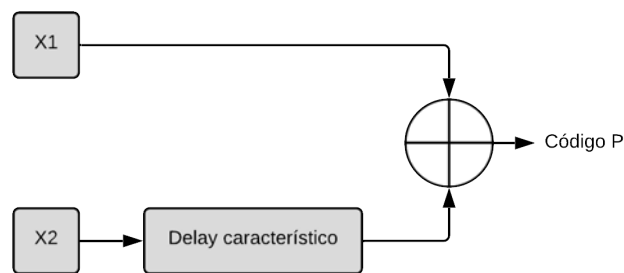


Figura 9-12. Obtención del Código P

### Tabla de frecuencias

| Señal                 | Referencia $f_0$ | Frecuencia (MHz)    |
|-----------------------|------------------|---------------------|
| Portadora L1          | $154 \times f_0$ | 1575,42             |
| Portadora L2          | $120 \times f_0$ | 1227,60             |
| Código C/A            | $f_0/10$         | 1,023               |
| Código P              | $f_0$            | 10,23               |
| Mensaje de navegación | $f_0/204.600$    | $50 \times 10^{-6}$ |

Tabla 9-1. Frecuencias derivadas de la fundamental

En resumen, el código C/A se suma, según la operación XOR, con los datos respectivos a los mensajes de navegación, proceso que se repite simultáneamente con el código P.

La portadora L1 se forma por la suma de dos señales moduladas en BPSK desfasadas  $90^\circ$  entre sí, lo que es lo mismo decir que la resultante es una señal modulada en QPSK. Las dos señales moduladoras son, por un lado, el código C/A junto con los datos de navegación, y, por otro, el código P.

La portadora L2 es el resultado de una modulación BPSK, donde la señal moduladora es el código P junto a los datos de navegación.

### 9.3. Mensajes de navegación

Sirven para dar soporte a los receptores GPS, brindando datos básicos como la posición y el tiempo del satélite al momento de la transmisión del mensaje. Estos datos son corregidos y actualizados constantemente por el segmento de control debido a que los satélites pueden sufrir desviaciones de su órbita teórica o desfases en sus relojes. Luego, cada receptor hace las mediciones con estos datos para calcular su propia posición.

Los datos de navegación se transmiten tanto en L1 como en L2, a una tasa de bits de 50 bps. Su formato básico es el de una trama de 1500 bits, dividida en 5 subtramas de 300. Las subtramas 1, 2 y 3 se repiten en cada trama, mientras que las 4 y 5 varían su contenido y tienen 25 versiones diferentes. A 50 bps significa que la transmisión de cada subtrama dura 6 segundos, la de una trama 30 segundos, y el mensaje completo 12,5 minutos.

Cada subtrama comienza con dos palabras especiales, la primera es la palabra TLM (telemetry), continuada por la palabra HOW (handover word). TLM es utilizada para la sincronización de las subtramas y siempre empieza con un preámbulo de 8 bits. HOW comienza con 17 bits que contienen una versión truncada la hora de la semana GPS, junto un indicador que marca el número de subtrama se está transmitiendo.

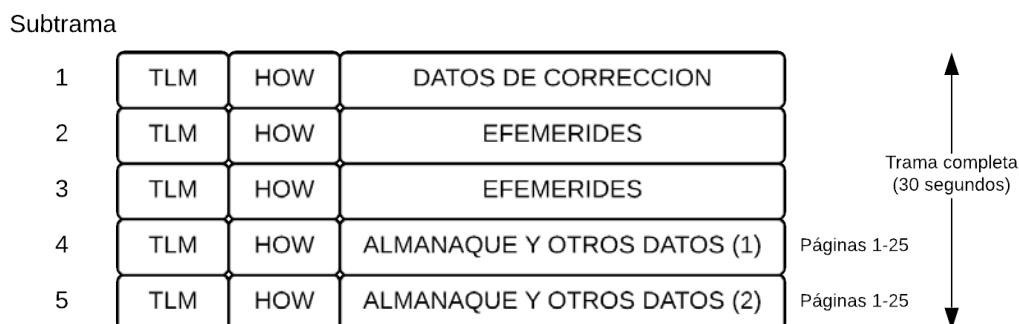


Figura 9-13. Mensaje de navegación

Los datos de corrección de la subtrama 1 incluyen el número de semana GPS, los parámetros de corrección del reloj del satélite y la salud de este en tiempo real, lo que nos indica si está transmitiendo información confiable en ese momento.

Las efemérides son un conjunto de parámetros que permiten calcular la órbita del satélite que está transmitiendo la señal como así también su posición dentro de la misma.

El almanaque es la versión simplificada de las efemérides, y permite calcular las coordenadas de cada uno de los satélites de forma aproximada.

En la subtrama 4 se transmite el almanaque y la salud de los satélites 25 al 32, junto con mensajes especiales, y datos referidos al estado ionosférico y de los relojes satelitales.

En la subtrama 5 se transmite el almanaque y la salud de los satélites 1 al 24, junto con referencias de tiempo y del número de semana GPS.

Los almanagues tienen una validez teórica de 6 meses, pero lo aconsejable es actualizarlo cada semana.

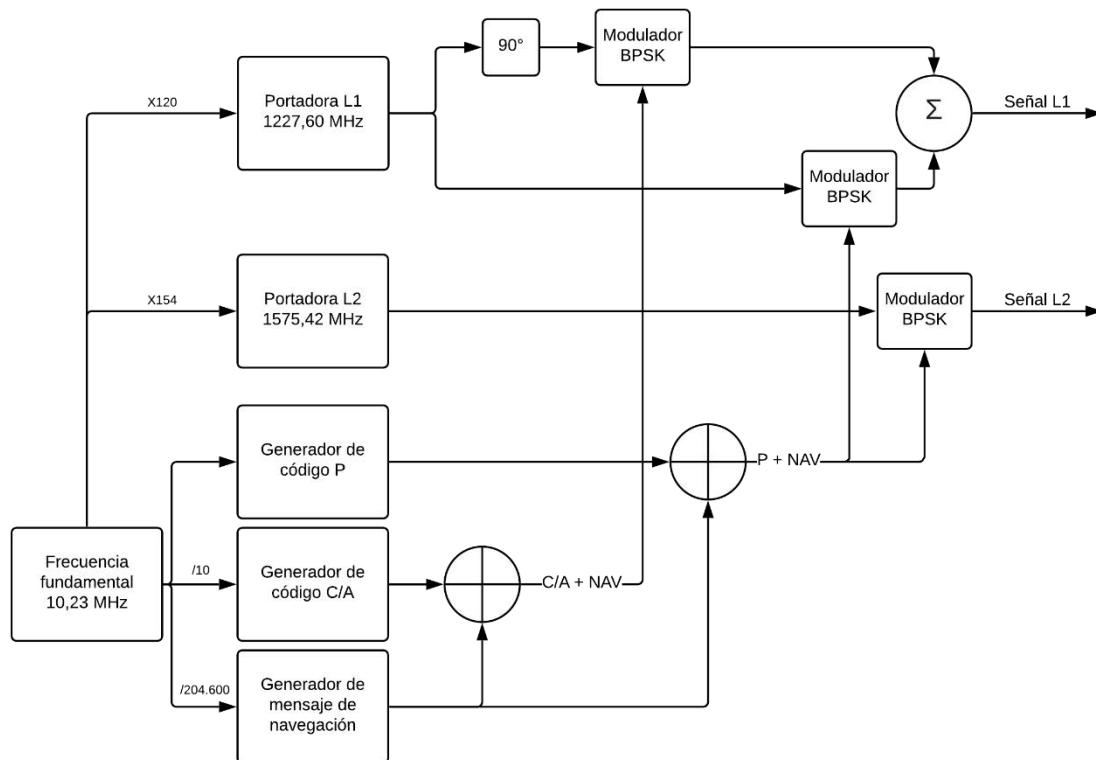


Figura 9-14. Generación de señal L1 y L2

## 9.4. Transmisión satelital

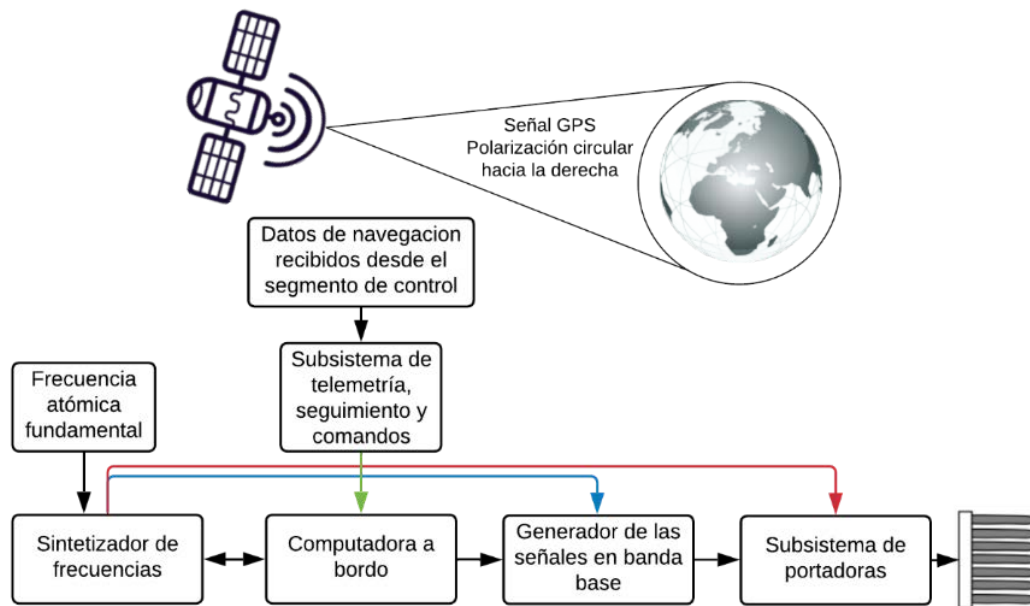


Figura 9-15. Sistema de transmisión en el satélite

En la figura 9-15 se muestra un resumen de los elementos más importantes dentro del satélite. A continuación, se explica que hace cada uno de ellos.

La frecuencia atómica fundamental provee la base de tiempo estable para todo el satélite. Esta frecuencia es de 10,23 MHz y a partir de ella se generan todas las señales satelitales, es decir, todas son múltiplos o divisores de la fundamental.

La computadora a bordo recibe los datos de navegación (NAV) provenientes del segmento de control, por medio del subsistema de telemetría, seguimiento y comandos.

El generador de señales en banda base genera los ruidos pseudoaleatorios y les adiciona los datos de navegación recibidos anteriormente.

Por último, el subsistema de portadoras modula las secuencias binarias generadas sobre las frecuencias L1 (1575,42 MHz), L2 (12276,6 MHz) y la todavía no operacional L5 (1176,45 MHz). Todas estas señales son transmitidas vía broadcast por una antena helicoidal.

Cada satélite transmite un mínimo de dos PRN, que son el código P y el C/A. Los mensajes de navegación que se les adiciona a estos códigos son los mismos, denominados LNAV (Legacy NAV).

## 10. Combinación de fase de portadora y determinación de ambigüedades

El posicionamiento con precisión a partir técnicas GNSS requiere de procedimientos o técnicas que eliminen los errores propios del sistema. El método con mayor garantía y precisión es el posicionamiento relativo, el cual requiere combinaciones de ecuaciones de observación de la fase portadora, respecto a diferentes satélites, estaciones y tiempos. En ese proceso se realizan combinación de simples, dobles y triples diferencias de fases de portadoras

El objetivo del posicionamiento relativo consiste en la determinación de las componentes del vector que une dos puntos A y B, donde uno de ellos se establece como fijo y con coordenadas conocidas. A ese vector se lo denomina línea base.

### 10.1. Simples diferencias de fase

Se basa en la observación hacia un satélite, al que denominaremos j, por parte de dos receptores distintos, A y B, en un mismo instante de tiempo. De este modo la ecuación de fase para un receptor cualquiera i y un satélite j es la siguiente:

$$\phi_i^j = \frac{\rho_i^j}{\lambda} + \frac{(\Delta\delta) \cdot c}{\lambda} + N_i^j + \frac{\Delta_i^{j \text{ tropo}}}{\lambda} - \frac{\Delta_i^{j \text{ iono}}}{\lambda} + \Delta_m + \varepsilon_p$$

Donde

- $\phi_i^j$  es la longitud del desfase entre de la señal recibida por el receptor i y la transmitida por el satélite j
- $\rho_i^j$  es la distancia entre el satélite j y el receptor i
- $\Delta\delta$  es la deriva de los relojes tanto en el satélite j como en el receptor i
- c es la velocidad de la luz
- $N_i^j$  es la cantidad de ciclos enteros que viajó la onda en el tramo satélite-receptor
- $\Delta_i^{j \text{ tropo}}$  son los errores a causa del retardo troposférico
- $\Delta_i^{j \text{ iono}}$  son los errores a causa del retardo ionosférico
- $\Delta_m$  son los errores a causa de trayectorias multicamino
- $\varepsilon_p$  son otros errores

En el caso de un satélite j y un receptor A será

$$\phi_A^j = \frac{\rho_A^j}{\lambda} + \frac{(\Delta\delta_A - \Delta\delta^j) \cdot c}{\lambda} + N_A^j + \frac{\Delta_A^{j \text{ tropo}}}{\lambda} - \frac{\Delta_A^{j \text{ iono}}}{\lambda} + \Delta_m + \varepsilon_p$$

Y para un satélite j y un receptor B

$$\phi_B^j = \frac{\rho_B^j}{\lambda} + \frac{(\Delta\delta_B - \Delta\delta^j) \cdot c}{\lambda} + N_B + \frac{\Delta_B^{j \text{ tropo}}}{\lambda} - \frac{\Delta_B^{j \text{ iono}}}{\lambda} + \Delta_m + \varepsilon_p$$

Ahora, haciendo la diferencia entre estas ecuaciones queda lo siguiente

$$\phi_B^j - \phi_A^j = \frac{\rho_B^j - \rho_A^j}{\lambda} + \frac{(\delta_B - \delta_A) \cdot c}{\lambda} + N_B - N_A + \frac{\Delta_B^{j \text{ tropo}}}{\lambda} - \frac{\Delta_A^{j \text{ tropo}}}{\lambda} - \frac{\Delta_B^{j \text{ iono}}}{\lambda} + \frac{\Delta_A^{j \text{ iono}}}{\lambda}$$

Reescribiendo, para simplificar la escritura:

$$0_B \phi_A^j = \phi_B^j - \phi_A^j = \frac{\Delta\rho_{BA}^j}{\lambda} + \frac{\Delta\delta_{BA} \cdot c}{\lambda} + \Delta N_{BA}^j + \frac{\Delta_{BA}^{j \text{ tropo}}}{\lambda} - \frac{\Delta_{BA}^{j \text{ iono}}}{\lambda}$$

De esta manera se eliminan los términos del estado del reloj del satélite  $\Delta\delta^j$  y los errores  $\Delta_m$  y  $\varepsilon_p$ .

Las incógnitas siguen siendo la diferencia entre los estados de los relojes de los receptores, la diferencia entre las ambigüedades N, las diferencias entre las distancias de los puntos A y B hacia el satélite j y todos los términos correspondientes al estado atmosférico.

## 10.2. Dobles diferencias

En este caso es necesaria la observación hacia dos satélites j y k, por parte de dos receptores A y B, en el mismo instante de observación. Esto no es ni más ni menos que aplicar simples diferencias a dos satélites diferentes para luego hacer la resta entre estos dos resultados.

Como ya se detalló, la ecuación de fase de simple diferencias hacia un satélite j es

$$0_B \phi_A^j = \phi_B^j - \phi_A^j = \frac{\Delta\rho_{BA}^j}{\lambda} + \frac{\Delta\delta_{BA} \cdot c}{\lambda} + \Delta N_{BA}^j + \frac{\Delta_{BA}^{j \text{ tropo}}}{\lambda} - \frac{\Delta_{BA}^{j \text{ iono}}}{\lambda}$$

Por lo que para un satélite k la misma vendrá dada por

$$0_B \phi_A^k = \phi_B^k - \phi_A^k = \frac{\Delta\rho_{BA}^k}{\lambda} + \frac{\Delta\delta_{BA} \cdot c}{\lambda} + \Delta N_{BA}^k + \frac{\Delta_{BA}^{k \text{ tropo}}}{\lambda} - \frac{\Delta_{BA}^{k \text{ iono}}}{\lambda}$$

Haciendo la diferencia entre ambas, tenemos

$$0_B \phi_A^k - 0_B \phi_A^j = \frac{\Delta\rho_{BA}^k - \Delta\rho_{BA}^j}{\lambda} + \Delta N_{BA}^k - \Delta N_{BA}^j + \frac{\Delta_{BA}^{k \text{ tropo}} - \Delta_{BA}^{j \text{ tropo}}}{\lambda} - \frac{\Delta_{BA}^{k \text{ iono}} - \Delta_{BA}^{j \text{ iono}}}{\lambda}$$

Reescribiendo

$$0_B^k \phi_A^j = \frac{\Delta\rho_{BA}^{kj}}{\lambda} + \Delta N_{BA}^{kj} + \frac{\Delta_{BA}^{kj \text{ tropo}}}{\lambda} - \frac{\Delta_{BA}^{kj \text{ iono}}}{\lambda}$$

De esta forma se eliminan los estados de los relojes de ambos receptores, pero todavía quedan las distancias, las ambigüedades N y los errores atmosféricos.

### 10.3. Triples diferencias

Lo que se propuso para finalmente poder calcular las variables desconocidas hasta este punto fue realizar la resta entre dos ecuaciones de dobles diferencias, cada una de ellas medidas en dos tiempos distintos pero muy cercanos. Matemáticamente la expresión de dobles diferencias en un tiempo  $t_1$  es:

$$0_B \phi_{A(t_1)}^k - 0_B \phi_{A(t_1)}^j = \frac{\Delta \rho_{BA(t_1)}^k - \Delta \rho_{BA(t_1)}^j}{\lambda} + \Delta N_{BA(t_1)}^k - \Delta N_{BA(t_1)}^j + \frac{\Delta_{BA(t_1)}^{k \text{ tropo}} - \Delta_{BA(t_1)}^{j \text{ tropo}}}{\lambda} - \frac{\Delta_{BA(t_1)}^{k \text{ iono}} + \Delta_{BA(t_1)}^{j \text{ iono}}}{\lambda}$$

Y para un tiempo  $t_2$

$$0_B \phi_{A(t_2)}^k - 0_B \phi_{A(t_2)}^j = \frac{\Delta \rho_{BA(t_2)}^k - \Delta \rho_{BA(t_2)}^j}{\lambda} + \Delta N_{BA(t_2)}^k - \Delta N_{BA(t_2)}^j + \frac{\Delta_{BA(t_2)}^{k \text{ tropo}} - \Delta_{BA(t_2)}^{j \text{ tropo}}}{\lambda} - \frac{\Delta_{BA(t_2)}^{k \text{ iono}} + \Delta_{BA(t_2)}^{j \text{ iono}}}{\lambda}$$

Al hacer la resta entre ambas ecuaciones, nos queda que se anulan los términos correspondientes a la cantidad de ciclos  $N$  y los referidos a efectos atmosféricos. Esto es así porque al ser  $t_1$  y  $t_2$  dos instantes de tiempo muy próximos, se considera que no hay cambios en el número  $N$  ni en los efectos atmosféricos, por lo que la resta de estos términos tiende a cero. Entonces

$$\left( 0_B \phi_{A(t_2)}^k - 0_B \phi_{A(t_2)}^j \right) - \left( 0_B \phi_{A(t_1)}^k - 0_B \phi_{A(t_1)}^j \right) = \left( \frac{\Delta \rho_{BA(t_2)}^k - \Delta \rho_{BA(t_2)}^j}{\lambda} \right) - \left( \frac{\Delta \rho_{BA(t_1)}^k - \Delta \rho_{BA(t_1)}^j}{\lambda} \right)$$

Por lo tanto, la ecuación resultante queda únicamente en función de distancias  $\rho$ , que son datos que a priori se consideran conocidos. De esta manera pueden utilizarse esos datos para calcular el número  $N$  de ambigüedades con la ecuación de dobles diferencias, que es el reto principal que todo GNSS tiene por delante.

A continuación, se muestra un resumen de los términos que se cancelan a medida que se implementan las combinaciones de portadora ya mencionadas.

| Términos en ecuación                  | Técnica | Simples diferencias | Dobles diferencias | Triples diferencias |
|---------------------------------------|---------|---------------------|--------------------|---------------------|
| Distancia satélite-receptor           |         |                     |                    |                     |
| Deriva del reloj en el satélite       |         | X                   |                    |                     |
| Deriva del reloj receptor             |         |                     | X                  |                     |
| Ciclos enteros de portadora recibidos |         |                     |                    | X                   |
| Retardos ionosféricos                 |         |                     |                    | X                   |
| Retardos troposféricos                |         |                     |                    | X                   |
| Errores multi camino                  |         | X                   |                    |                     |
| Otros errores                         |         | X                   |                    |                     |

Tabla 10-1. Simple, dobles y triples diferencias

## 11. Sistema RTK

El sistema cinemático en tiempo real (Real Time Kinematic) es un tipo de GNSS diferencial, por lo que se basa en la utilización de dos o más receptores para un mismo conjunto de mediciones. RTK opera en tiempo real mediante la eliminación o disminución de la mayoría de los errores que se infiltran en las mediciones, principalmente el retardo ionosférico.

Los receptores fijos con coordenadas conocidas son los encargados de determinar los errores introducidos en la medición, para que posteriormente el receptor móvil los utilice para corregir su posición previamente calculada. Estos errores son calculados de manera independiente para cada satélite, puesto que no tienen forma de saber si los satélites que observan son los mismos que observa la estación móvil.

Las coordenadas y sus correcciones pueden ser calculadas en las frecuencias L1 y L2, y también por observables de código y fase. Esto último es la diferencia fundamental con un simple sistema DGPS.

Un factor importante es el lapso que lleva el cálculo de las correcciones y el tiempo en que dichas correcciones llegan al móvil. El receptor móvil recibe la señal de correcciones y las aplica de acuerdo con las señales de los satélites que está recibiendo.

Este método exige un formato de envío de correcciones, un sistema de comunicaciones y un software específico para la interconexión de todo el sistema. Las correcciones son transmitidas generalmente en un formato llamado RTCM, pero también pueden estar en cualquier otro formato propietario.

El receptor móvil puede recibir las correcciones por diferentes medios, tales como sistemas de radio, internet, telefonía, etc. Y esto es lo que hace que existan diferentes clasificaciones de geoposicionamiento diferencial.

Es entonces donde podemos preguntarnos, ¿cuántas antenas fijas son necesarias? La respuesta queda en función de dos variables:

- Zona de cobertura: los receptores, al tener que enviar y recibir datos, quedan limitados al alcance que tengan, impedimento que surge al ser transmisiones inalámbricas. Esto se refiere a que cada uno de ellos pueda comunicarse con la parte de la red que le corresponda, independientemente del sistema de comunicaciones que se utilice. Si el móvil no está en zona de cobertura nunca podrá acceder a las correcciones enviadas por las estaciones.
- Composición de la atmósfera: la corrección de errores parte de la base en que los errores atmosféricos son iguales en todos los receptores. Se debe prever que la distancia entre estos no sea lo suficientemente grande como para que se encuentren en puntos sobre los que la composición atmosférica sea diferente, generando correcciones erróneas para el receptor.

## 11.1. Tipos de soluciones RTK

### 11.1.1. Estación simple

Es el método más sencillo, el cual consiste en un receptor móvil recibiendo correcciones desde un único receptor fijo. Este último puede ser una estación permanente o bien provisoria, sin embargo, es el tipo de solución que se desarrollará en esta tesis, donde las antenas serán ubicadas en coordenadas permanentes.

Al ser una sola estación de referencia, no es posible hacer correcciones respecto a los errores introducidos en el tramo entre el receptor fijo y móvil debido a los cambios en la composición atmosférica, motivo por el cual se recomienda que la distancia entre ambos no supere los 20 km.

Lo habitual en estos casos es utilizar enlaces UHF o VHF para la transmisión de las correcciones, donde tanto la frecuencia como la potencia de transmisión dependen de las normativas vigentes en cada región. Cabe aclarar que todas estas comunicaciones se realizan de manera unidireccional.

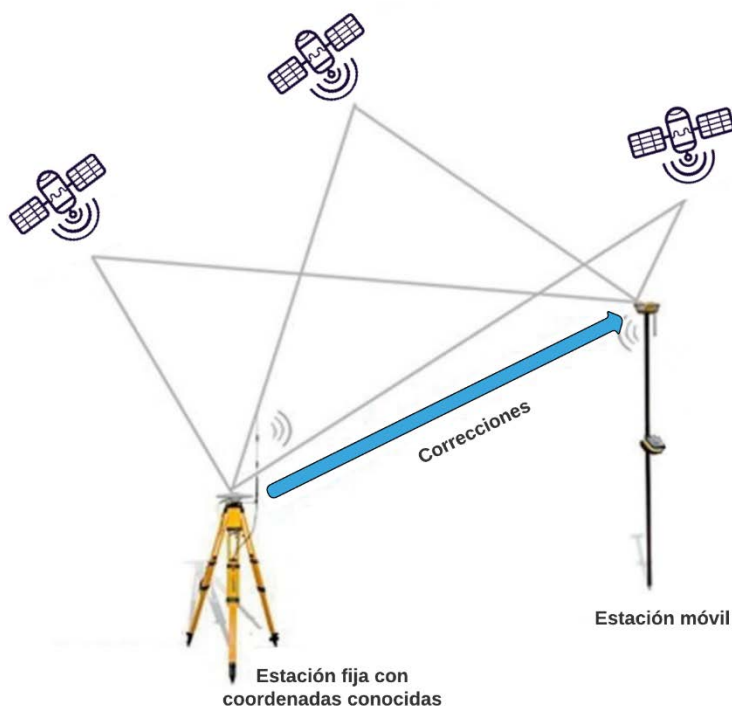


Figura 11-1. Sistema RTK

### 11.1.2. Red de estaciones

Consiste en un conjunto de estaciones permanentes que están constantemente recibiendo señales GPS, las cuales son enviadas a un centro de control que es el encargado de gestionar la red y calcular las correcciones. Este tipo de solución permite el posicionamiento en tiempo real pero también son factibles análisis postproceso.

Lo ideal es que esta red tenga visibilidad hacia, por lo menos, seis satélites en todo momento para garantizar redundancia y fiabilidad de datos.

Este tipo de solución permite generar modelos de corrección al tener varios receptores fijos que colaboran entre sí. Al mismo tiempo esto permite que el radio de cobertura de cada antena sea más extenso, puesto que al gestarse modelos de corrección se pueden también predecir los errores atmosféricos que se producen entre las estaciones fijas y móviles.

Es fundamental que se conozcan las coordenadas precisas de cada estación y que la resolución de las ambigüedades por el método de doble diferencias se determine para cada una de ellas.

El medio de transmisión de las correcciones suelen ser redes de telecomunicaciones ya existentes, como las de telefonía celular. Las redes RTK fueron evolucionando a la par de estas, desde sus orígenes hasta las redes actuales de 4G y 5G. Estas comunicaciones pueden operar tanto en modo simplex como dúplex.

Motivos para utilizar modo dúplex

- La central recibe información sobre las estaciones de referencia a las que el móvil tiene acceso, pudiendo acotar errores que se introduzcan específicamente esas estaciones.
- La central identifica la estación más próxima al móvil, pudiendo así darle más prioridad a la misma sobre el modelo de correcciones a utilizar.
- En análisis postproceso, es posible recalcular la posición del móvil, ya que la central puede calcular correcciones sobre la posición ya corregida que le envía el receptor móvil.
- Al poder identificar a cada usuario, es posible realizar tareas de facturación del servicio.

Las dos primeras tareas en modo simplex, el encargado de realizarlas es el propio receptor móvil, quien, con menor capacidad de cómputo, es factible que obtenga menor precisión en los cálculos.

## 11.2. Formatos y protocolos

Para comprender la comunicación entre estaciones fijas y móviles, es necesario mencionar la diferencia entre un formato, que se dice que es la forma de codificar la información para ser almacenada y luego poder ser transmitida (RTCM y formatos propietarios), y un protocolo, que es un conjunto de reglas para comunicar dos puntos conectados (NMEA, NTRIP).

### 11.2.1. RTCM

RTCM es una organización independiente cuyas siglas significan Comisión Radiotécnica para Servicios Marítimos. A partir de la década del 80' empezaron a idear un protocolo que permita interoperabilidad entre distintas marcas de equipos GNSS, como así también el mayor rendimiento posible en las comunicaciones.

Se fueron creando diferentes versiones del protocolo RTCM, cada una con mejoras respecto a la anterior. Cada mensaje tiene una longitud de 30 bits, de los

cuales 24 son de información mientras que los últimos 6 son de paridad. Existen 64 mensajes RTCM diferentes.

A continuación, se mencionan algunas de las versiones más importantes de este protocolo:

- RTCM 2.0: solo permite el uso de GPS diferencial. Esto significa que no tiene en cuenta las fases de portadora, por lo que la exactitud gira alrededor del metro y no puede ser utilizada para aplicaciones RTK.
- RTCM 2.1: incluye dos nuevos tipos de mensajes que permiten la transmisión de datos de fases de portadora, por lo que a partir de esta versión son posibles las aplicaciones RTK, pero con una exactitud aún por mejorar.
- RTCM 2.3: introduce una serie de nuevos mensajes adicionales que posibilitan el intercambio de nuevos parámetros sobre las antenas, tales como la variación del centro de fase y el modelo de cada una. También, esta versión fue diseñada para enviar datos a través de UHF para lo cual agrega bits adicionales para la corrección de errores sobre la propia transmisión inalámbrica.
- RTCM 3.0: el principal avance de esta versión es la reducción del ancho de banda de los mensajes, lo que hace posible, por ejemplo, la transmisión de los mismos vía internet por medio de servicios de telefonía celular.
- RTCM 3.1: esta versión agrega correcciones RTK, lo cual significa que estas pueden ser enviadas directamente en lugar de que los móviles reciban mera información y ellos tener que hacer los cálculos.

Otros formatos propietarios:

- DBEN (de Ashtech, Magellan Professional)
- CMR y CMR++, CMRx (de Trimble Corporation)
- RTCA (Novatel, Leica y Sokkia)

Esta variedad de formatos sólo dificulta el trabajo, siendo prácticamente imposible trabajar en tiempo real RTK mezclando diferentes marcas de receptores GPS, debido a la diferencia entre los mensajes que las bases transmiten.

### **11.2.2. Protocolo NTRIP**

El protocolo Ntrip (Networked Transport of RTCM via Internet Protocol) es el estándar actual de transmisión de correcciones diferenciales. Está basado en el protocolo HTTP, y permite la transmisión de cualquier stream o flujo de datos desde una estación fija a una móvil o viceversa, por medio de internet. El medio de acceso a internet puede ser cualquier tipo de red, siempre y cuando la capacidad de la misma permita que el retardo entre correcciones no supere el lapso de 1-2 segundos.

La generación de correcciones GPS puede realizarse directamente en una estación de referencia particular, o bien mediante un conjunto de observaciones procedentes de una solución de red RTK. Todo este flujo de datos es enviado a un servidor, el cual hace posible el acceso a los mismos a través de internet.

Los componentes de un sistema Ntrip son:

- Ntrip Sources: son las estaciones permanentes, que generan las correcciones diferenciales.
- Ntrip Server: es un software instalado en el centro de control, cuya tarea es enviar las correcciones en formato RTCM desde un Ntrip Source hacia el Ntrip Caster.
- Ntrip Caster: es un servidor HTTP. Sus tareas son la de actuar como un nodo distribuidor entre el Ntrip Server y los clientes, y autenticar los usuarios conectados.
- Ntrip Client: es el programa que permite acceder a las correcciones, para posteriormente aplicarlas a la estación móvil. La finalidad de este componente es que las conexiones de los usuarios se hagan de manera sencilla, introduciendo únicamente una dirección IP y posteriormente las credenciales de cada uno.

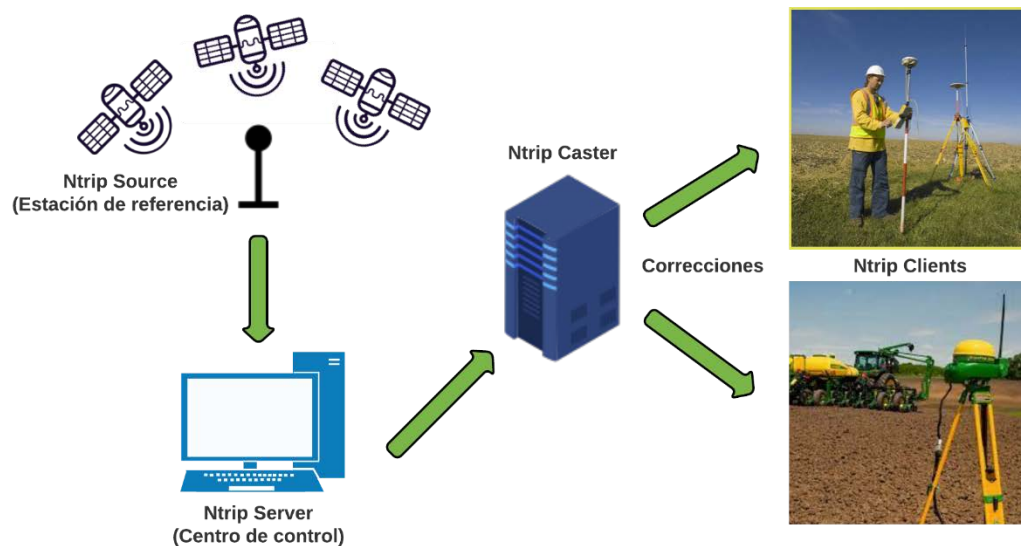


Figura 11-2. Protocolo NTRIP

### 11.2.3. Protocolo NMEA

Es utilizado para la comunicación entre dos estaciones GPS, sean fijas o móviles. Todos los datos transmitidos por este protocolo son a través de caracteres ASCII, por lo que requieren bajo costo y procesamiento, lo cual es ideal para estas aplicaciones.

Existen muchos tipos de mensajes NMEA, pero esencialmente son utilizados para la transmisión de los siguientes parámetros

- Tiempo, latitud, longitud
- Satélites activos
- Satélites a la vista
- Velocidad y orientación

### 11.3. Técnicas de modelado de correcciones utilizando NTRIP

El primer paso para cualquier corrección diferencial es obtener primero la resolución de ambigüedad de ciclos de portadora, para luego proseguir con la obtención de correcciones propiamente dicha. En el caso de soluciones de red RTK, un tercer paso es elegir una técnica que permita modelar esas correcciones. Se detallará la técnica VRS, pero también existen otras como FKP (Flächen Korrektur Paramete) o MAC (Master Auxiliary Concept).

#### 11.3.1. Virtual Reference Station (VRS)

Fue desarrollado por la empresa alemana Terrasat en 1997 y posteriormente adquirido por la empresa líder Trimble. Fue el primer sistema de corrección RTK en lo que a soluciones en red se refiere. Es una técnica que requiere conocer la posición de la estación móvil, por lo que se basa en una comunicación bidireccional.

Desde cada estación de referencia se envían los datos hacia un centro de control central, quien es el encargado de realizar las correcciones para la red. Posteriormente, se simula una estación de referencia virtual próxima a la ubicación del usuario, alrededor de un metro de distancia, en base a la cual se generan las correcciones que serán enviadas al receptor móvil.

#### Pasos

1. Las estaciones permanentes envían sus datos al centro de control por medio del protocolo NMEA
2. El móvil calcula y envía su posición aproximada al centro
3. El centro de control genera una estación virtual de referencia muy próxima al móvil y dentro del polígono que forman las estaciones permanentes cercanas
4. Aplica las correcciones de la red y calcula la posición de la estación virtual
5. Envía las correcciones al receptor móvil, quien calcula su posición respecto a la estación virtual

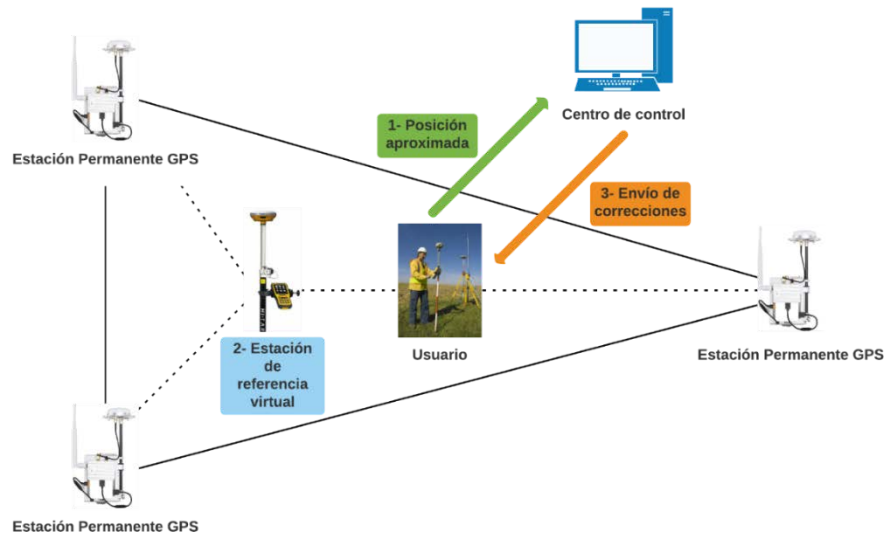


Figura 11-3. Sistema VRS

A fin de cuentas, lo que el usuario recibe son correcciones de RTK convencionales de estación simple, que en este caso pertenecen a la estación de referencia virtual, pero con la ventaja de que las correcciones realizadas fueron calculadas en base a toda una red de antenas y no respecto a una sola estación, disminuyendo así la cantidad de errores presente en las mediciones.

Este es un método propietario no estándar, por lo que utiliza algoritmos no publicados para generar las correcciones RTK.

### 11.3.2. Solución RTX

El tiempo real extendido (RTX) es una tecnología de posicionamiento producida por la combinación de distintas técnicas, que en conjunto ofrecen a los usuarios exactitud a nivel de centímetros de su posición, en tiempo real y en cualquier lugar del mundo.

Es una solución propietaria de la marca Trimble.

En esta técnica, el usuario recibe las correcciones vía satélite o por red celular, las cuales fueron previamente calculadas en un centro de control en base a una red global de estaciones permanentes.

Es una solución que no suplanta necesariamente a los sistemas RTK, sino que los complementa si por algún motivo quedan sin cobertura en un determinado momento y con precisiones similares.

Cuando está activado, el móvil rastrea al satélite RTX, el cual envía una serie de correcciones RTX que permiten que calcule su posición. Una red global de aproximadamente 100 estaciones permanentes repartidas por el mundo procesa los datos de órbitas y de relojes del satélite, y generan mejores soluciones y modelos precisos que corrigen los errores de las observaciones, con cobertura global.

Los errores atmosféricos se resuelven con algoritmos específicamente desarrollados para el sistema Trimble RTX, con un formato de envío propietario llamado CMRx.

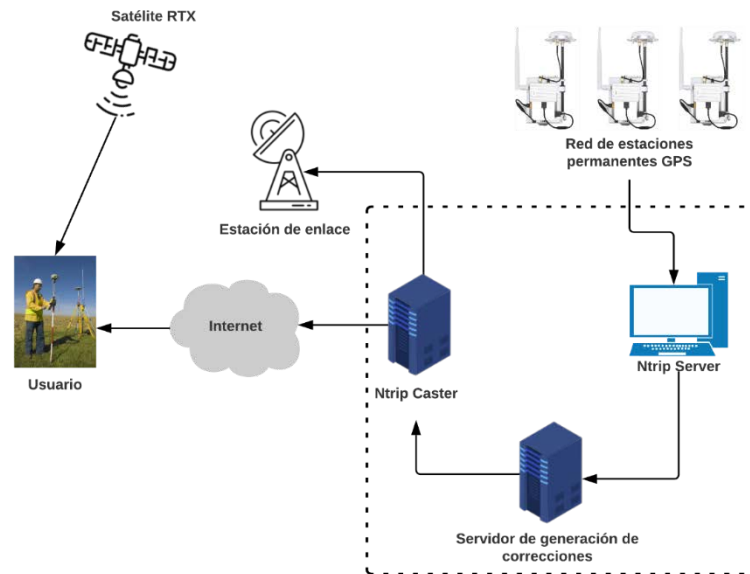


Figura 11-4. Solución RTX

## 12. Despliegue de red RTK

### 12.1. Consideraciones previas

El objetivo de esta tesis es encontrar los puntos adecuados para la instalación de estaciones permanentes RTK, que permitan la cobertura total de las zonas interesadas. Geográficamente, el trabajo estará enfocado en las zonas productivas del departamento de Anta, en la provincia de Salta.

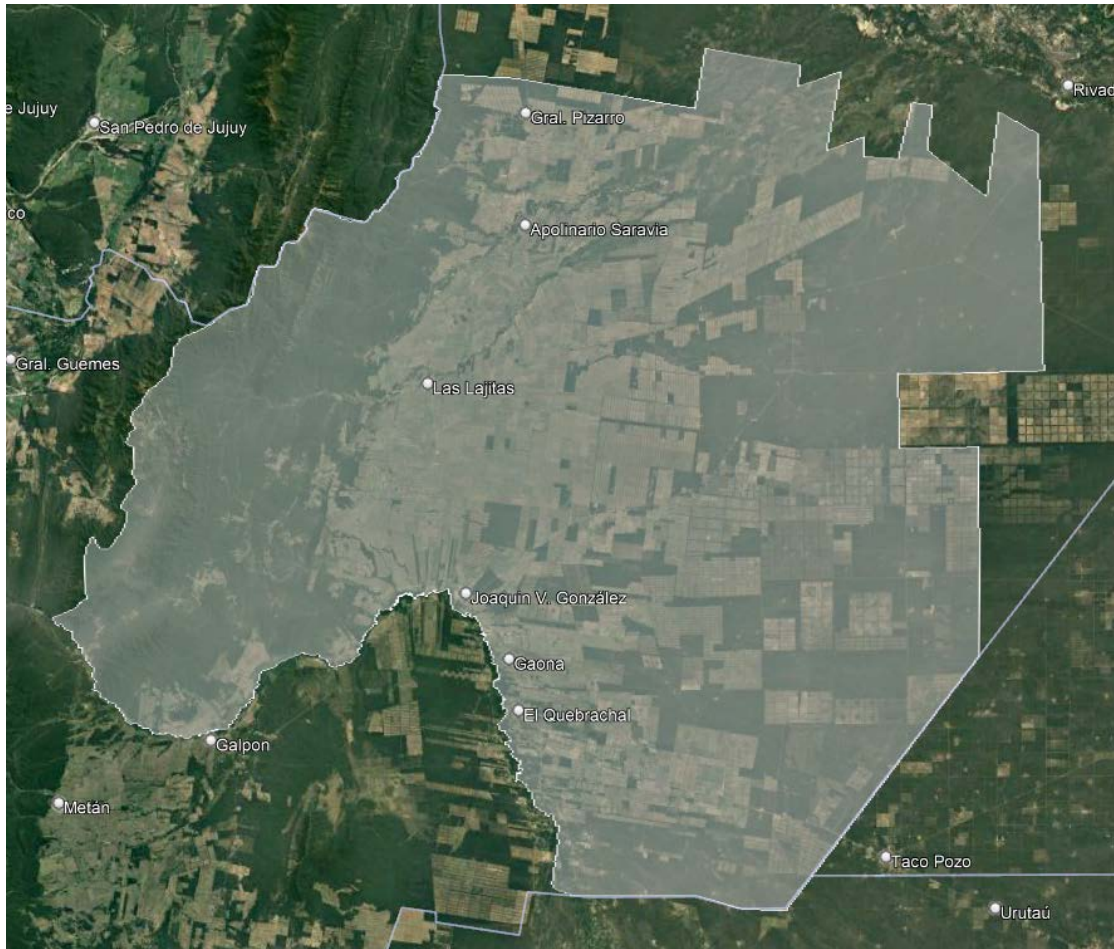


*Figura 12-1. Departamento Anta, Salta*

La premisa principal del trabajo fue colocar las antenas en lugares públicos, ya sea en territorio perteneciente al Estado Nacional o a la Provincia. También fue necesario que estos puntos sean de fácil acceso, motivo por lo que se decidió que estén colocadas al costado de la ruta, siempre y cuando sea posible.

Se dividió al departamento en 4 zonas. Hay una en la que no se puede lograr cobertura utilizando rutas estatales, por lo que se la aisló y denominó zona 4. Las zonas 1, 2 y 3 fueron delimitadas por cuestiones meramente geográficas y para un mejor desarrollo del tema.

En teoría, cada estación permanente puede cubrir un radio máximo de 20km, pero hay puntos en los que se consideraron distancias menores debido a diferencias topográficas de altitud presentes en la zona. Por ese mismo motivo no sólo se usaron antenas de cobertura omnidireccional, sino que también fueron necesarias de cobertura sectorial.

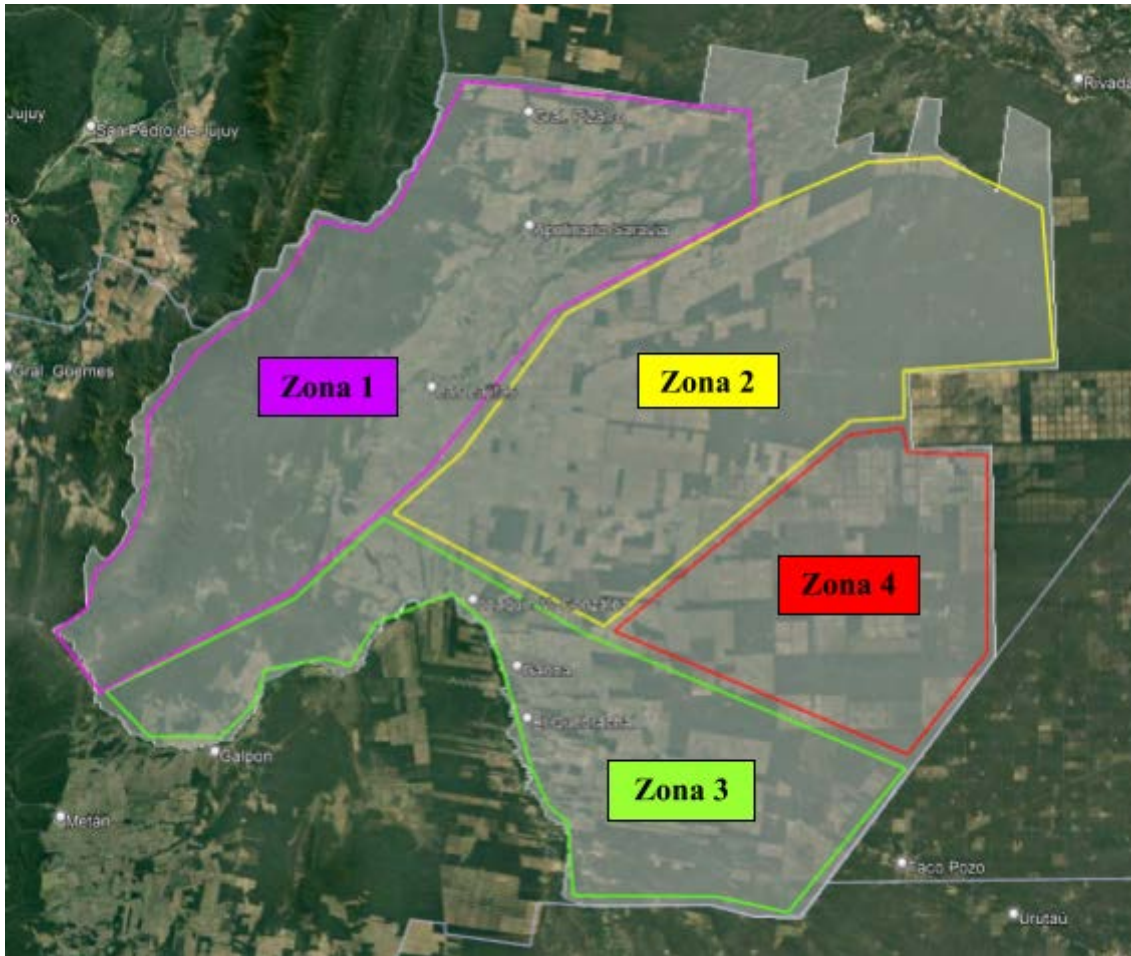


Figura 12-2. Anta dividida en 4 zonas

Para cada estación se hará un análisis de las líneas de vista más representativas para cada caso, considerando la altura de la torre, altura del receptor móvil, y zonas de Fresnel, utilizando la banda de frecuencias de 915-928 MHz.

Se hará un cálculo básico de la ecuación de transmisión utilizando el valor de 928 MHz ya que es en el que se presenta una mayor atenuación. La potencia de transmisión se fija en 27 dBm, mientras que se considera óptimo una sensibilidad entre -80 dBm y -180 dBm en las antenas receptoras. Durante todo el trabajo se considera que la altura de la antena en los receptores móviles es de 3 metros respecto al suelo.

Una vez que estén instaladas las estaciones será necesario que cuenten con algún tipo de alimentación eléctrica, para lo cual se propone el uso de sistemas de energía solar. Se dimensionará un único sistema que será replicado en cada una de las estaciones.

## 12.2. Ecuación básica de transmisión

Antes de comenzar con el despliegue, se harán los cálculos de enlaces básicos para determinar si la potencia de transmisión elegida es correcta para cubrir una distancia de 20km en una frecuencia de 928 MHz, con una sensibilidad resultante razonable. Luego, se repite teniendo en cuenta una frecuencia de 450 MHz, la cual es también utilizada

ampliamente en el mundo para este tipo de aplicaciones. Para ambos cálculos se consideran antenas con una ganancia de 2 dBi.

- Ecuación de transmisión

$$P_r = P_t + G_r + G_t - L$$

Donde

- $P_r$  es la potencia transmitida
- $P_t$  es la potencia recibida
- $G_r$  es la ganancia de la antena receptora
- $G_t$  es la ganancia de la antena transmisora
- $L$  son las pérdidas

Las pérdidas se calculan en base al modelo de Friis, que es el derivado más básico de las ecuaciones de Maxwell y es la base para la deducción del resto de modelos.

- Fórmula de pérdidas en 928 MHz

$$L = 32,4 + 20\log F(\text{MHz}) + 20\log D(\text{Km}) + L_{\text{cable}} + L_{\text{conectores}}$$

$$L = 32,4 + 20\log(928) + 20\log(20) + 0,5 + 2$$

$$L = 32,4 + 59,35 + 26,02 + 0,5 + 2$$

$$L = 120,27 \text{ dB}$$

Por lo que la potencia de recepción en la banda de 928 MHz debería ser como mínimo

$$P_r = 27 + 2 + 2 - 120,27$$

$$P_r = -89,27 \text{ dBm}$$

- Fórmula de pérdidas en 450 MHz

$$L = 32,4 + 20\log F(\text{MHz}) + 20\log D(\text{Km}) + L_{\text{cable}} + L_{\text{conectores}}$$

$$L = 32,4 + 20\log(450) + 20\log(20) + 0,5 + 2$$

$$L = 32,4 + 53,06 + 26,02 + 0,5 + 2$$

$$L = 113,98 \text{ dB} \cong 114 \text{ dB}$$

Por lo que la potencia de recepción en la banda de 450 MHz debería ser como mínimo

$$P_r = 27 + 2 + 2 - 114$$

$$P_r = -83 \text{ dBm}$$

Estos valores están dentro de los parámetros típicos para este tipo de aplicación, por lo que los enlaces se consideran viables bajo estas condiciones.

### 12.3. Modelo de propagación Longley-Rice

Cuando una señal es emitida, va perdiendo potencia punto por punto a lo largo de su trayecto, lo cual es así simplemente por la naturaleza de las señales electromagnéticas, pero a su vez, existen diferentes factores que influyen en una mayor o menor pérdida de potencia en cada uno de los puntos de su trayectoria. En transmisiones inalámbricas se intentan realizar modelos de propagación que permitan predecir las pérdidas que una señal sufre a lo largo de su recorrido. Existen diferentes modelos que pueden ser utilizados, cada uno de los cuales tiene en cuenta diferentes factores ya que se fueron pensados para distintos escenarios.

Se eligió el modelo de propagación Longley-Rice porque es óptimo para entornos rurales, ya que tiene en cuenta factores como el clima y la conductividad del suelo. Este modelo es utilizado por el software Link Planner de Cambium Networks.

Longley-Rice es un modelo de propagación para predecir la atenuación de señales de radio para un enlace de telecomunicaciones en el rango de frecuencia de 20 MHz a 20 GHz. Fue creado por los científicos Anita Longley y Phil Rice para las necesidades de planificación de frecuencias de UHF. El mismo consta de dos modos de cálculo, uno es para “predicciones de área” y el otro para “punto a punto”.

El primero se utiliza cuando no se tienen muchos datos sobre el terreno del enlace, por lo que los parámetros del mismo se calculan estimando e interpolando la información disponible. El segundo es utilizado cuando se tiene una gran cantidad de datos del perfil del terreno, por lo que maneja más información y es más preciso.

A continuación, se muestran los principales datos de entrada del modelo para predicciones de área.

#### 12.3.1. Datos de entrada

El modelo tiene un cierto número de parámetros que introduce en su cálculo. Los más importantes son:

| Parámetros del sistema                        |                       |
|-----------------------------------------------|-----------------------|
| Frecuencia (f)                                | 20 MHz a 20 GHz       |
| Distancia (d)                                 | 1 Km a 2000 Km        |
| Altura de las antenas ( $h_{a1}$ , $h_{a2}$ ) | 0,5 m a 3000 m        |
| Polarización                                  | Vertical u horizontal |
| Parámetros ambientales                        |                       |
| Irregularidad del terreno                     | $\Delta h$            |
| Constante eléctrica del suelo                 | $Z_g$                 |
| Refractividad de la superficie                | $N_s$                 |
| Curvatura efectiva de la Tierra               | $\gamma_e$            |

- Irregularidad del terreno: El terreno que separa al transmisor y receptor es tratado como una función aleatoria de la distancia entre ambas terminales. Para caracterizar esta función, el modelo utiliza un único valor  $\Delta h$  para representar de manera sencilla el tamaño de las irregularidades. Más concretamente,  $\Delta h$  es el rango interdecil resultante luego de eliminar el 10% de las elevaciones más altas y bajas del terreno. Los valores que sigue el modelo son:

| Tipo de terreno                 | $\Delta h$ (metros) |
|---------------------------------|---------------------|
| Llano o claros de agua          | 0                   |
| Plano (con escasas variaciones) | 30                  |
| Sierras                         | 60                  |
| Montañas                        | 200                 |
| Montañas empinadas              | 500                 |

- Constante eléctrica del suelo: generalmente está definida en términos de la permitividad ( $\epsilon_r$ ) y conductividad ( $\sigma$ ) relativa de la Tierra, y de la polarización de las ondas de RF que estén presentes. Por lo tanto:

$$Z_g = \begin{cases} \sqrt{\epsilon'_r - 1} & \text{para polarización horizontal} \\ \sqrt{\epsilon'_r - \frac{1}{\epsilon'_r}} & \text{para polarización vertical} \end{cases}$$

Donde  $\epsilon'_r$  es la permitividad relativa compleja, definida por

$$\epsilon'_r = \epsilon_r + iZ_0 \frac{\sigma}{k} \quad Z_0 = 376,62 \, \Omega$$

Los valores tabulados sugeridos para el cálculo son los siguientes:

| Terreno     | Permitividad relativa | Conductividad relativa |
|-------------|-----------------------|------------------------|
| Promedio    | 15                    | 0,005                  |
| Seco        | 4                     | 0,001                  |
| Húmedo      | 25                    | 0,020                  |
| Agua dulce  | 81                    | 0,010                  |
| Agua salada | 81                    | 5                      |

- Refractividad de la superficie: Las constantes atmosféricas, y en particular la refracción atmosférica, son tratadas como funciones aleatorias de posición y de tiempo. Para caracterizar estas funciones, lo que el modelo propone es utilizar un único valor  $N_s$  que represente el valor de la refractividad cercana a la superficie. Usualmente se mide en unidades N (partes por millón), y los valores que el modelo recomienda son los siguientes:

| Clima                          | $N_s$ |
|--------------------------------|-------|
| Ecuatoria                      | 360   |
| Continental subtropical        | 320   |
| Subtropical marítimo           | 370   |
| Desierto                       | 280   |
| Continental templado           | 301   |
| Marítimo templado sobre tierra | 320   |
| Marítimo templado sobre el mar | 350   |

#### 12.4. Cobertura Zona 1

La zona 1 contiene 12 estaciones permanentes, situadas sobre la ruta provincial 5 y sus alrededores. Es importante tener en cuenta que no se dispusieron antenas en todo el sector oeste debido a que es una zona montañosa sin productividad. Los sitios de colocación de antenas se enumeraron de izquierda a derecha.

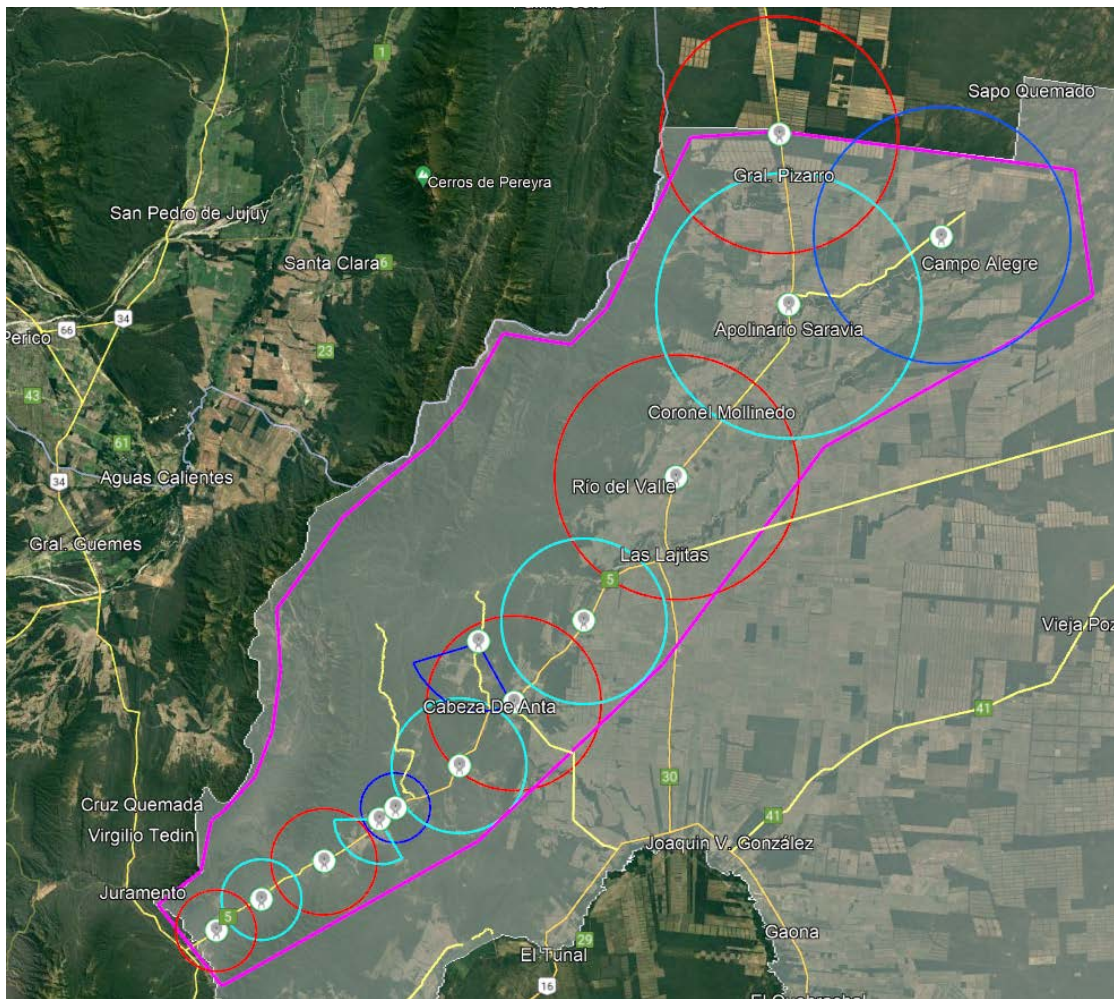


Figura 12-3. Cobertura zona 1

#### 12.4.1. Sitio 1

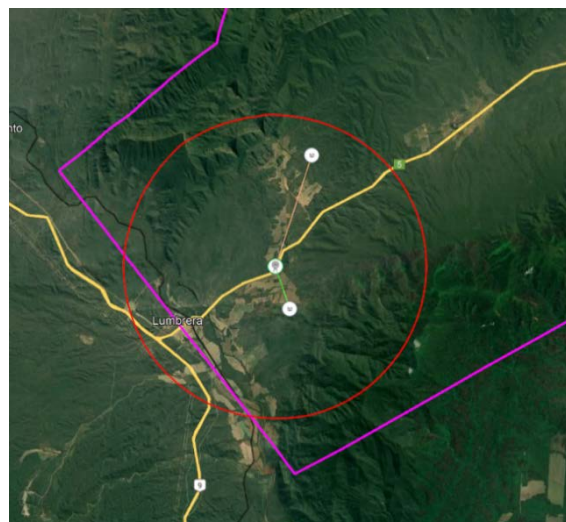
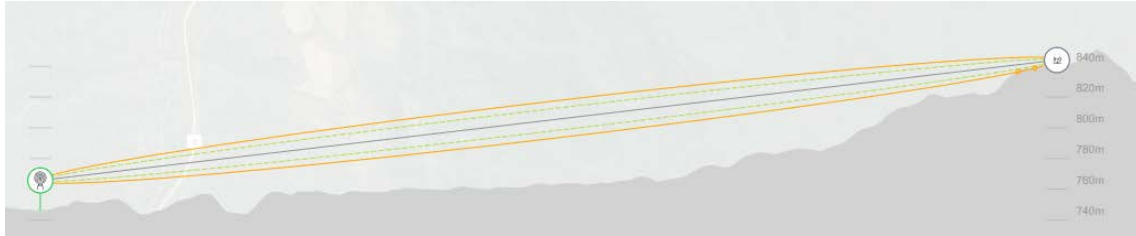


Figura 12-4. Cobertura Zona 1 - Sitio 1

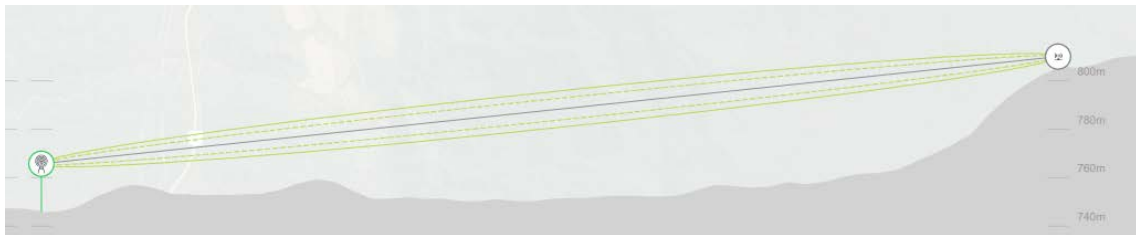
Está en las coordenadas -25.194411,-64.886283. Para cubrir las zonas requeridas se necesitó montar la antena en una torre de 20 metros de altura. Está previsto que cubra una distancia de 6km.

Se posicionaron dos receptores en las zonas más críticas para analizar si la cobertura es factible, tal como muestra la Figura 12-4.

#### *Línea de vista medición 1*



#### *Línea de vista medición 2*



### **12.4.2. Sitio 2**

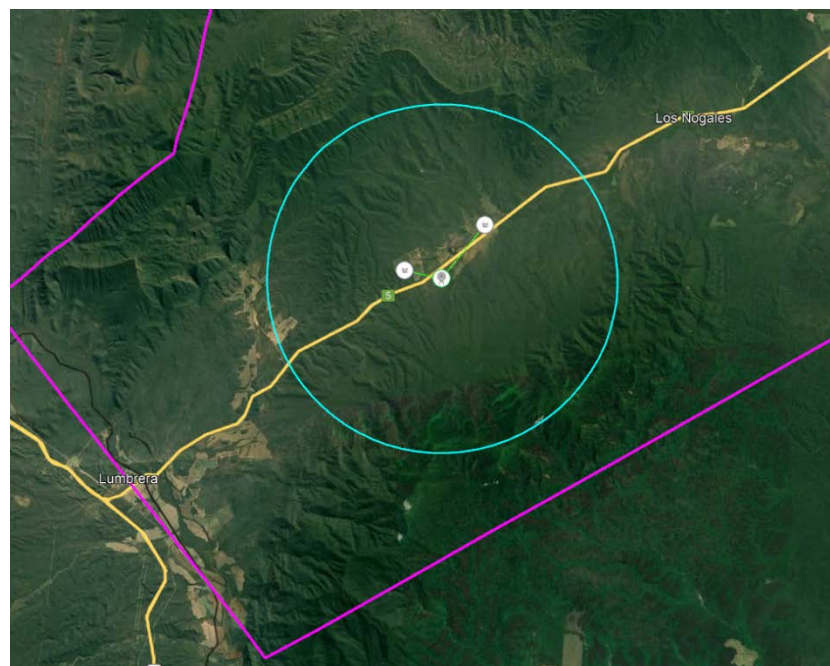
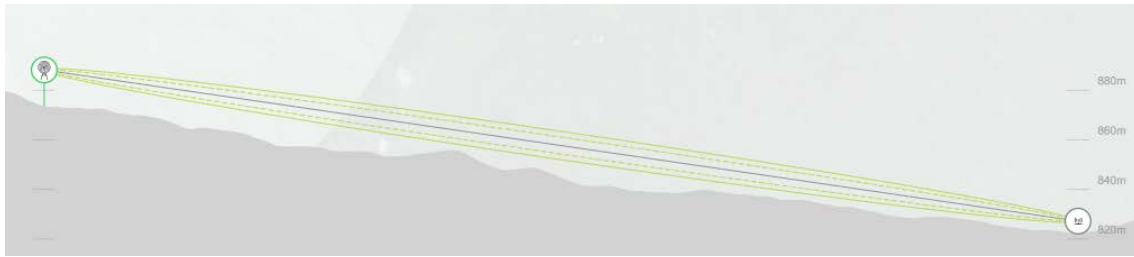


*Figura 12-5. Cobertura Zona 1 - Sitio 2*

Se montó sobre una torre de 15m, en las coordenadas -25.15605,-64.816417. Está previsto que cubra una distancia de 6km.

Las dos mediciones de línea de vista se realizaron sobre los puntos que muestra la Figura 12-5.

#### *Línea de vista medición 1*



*Línea de vista medición 2*



### 12.4.3. Sitio 3

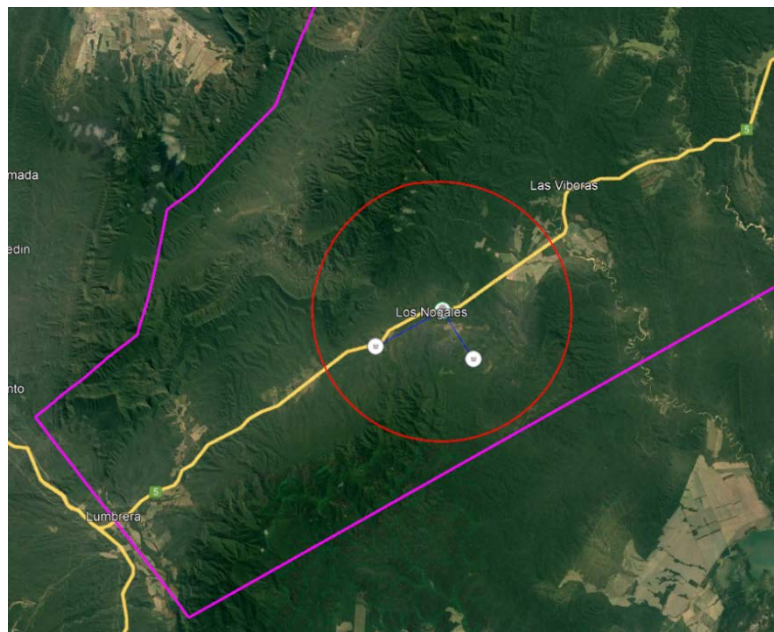
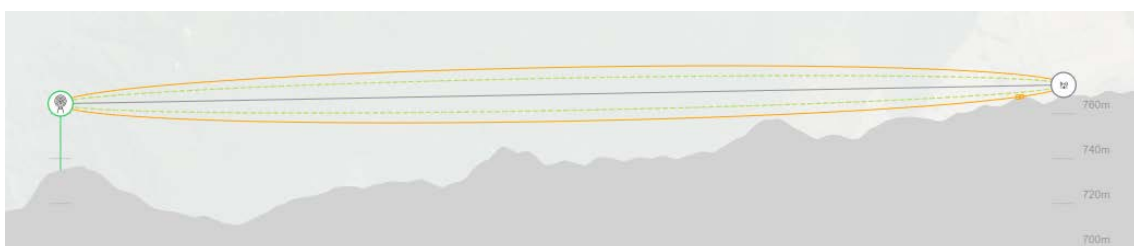


*Figura 12-6. Cobertura Zona 1 - Sitio 3*

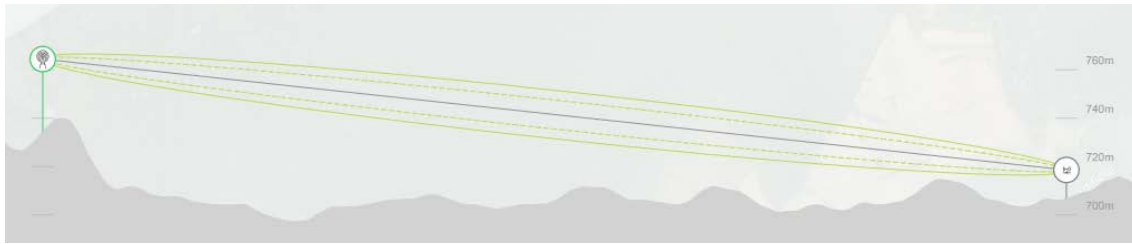
Para este sitio fue necesaria una torre de 25 metros, ubicada en las coordenadas -25.109956,-64.72022. Está previsto que cubra una radio de 8km.

Las líneas de vista en los puntos más críticos se midieron según la Figura 12-16.

*Línea de vista medición 1*



### *Línea de vista medición 2*



### **12.4.4. Sitio 4**

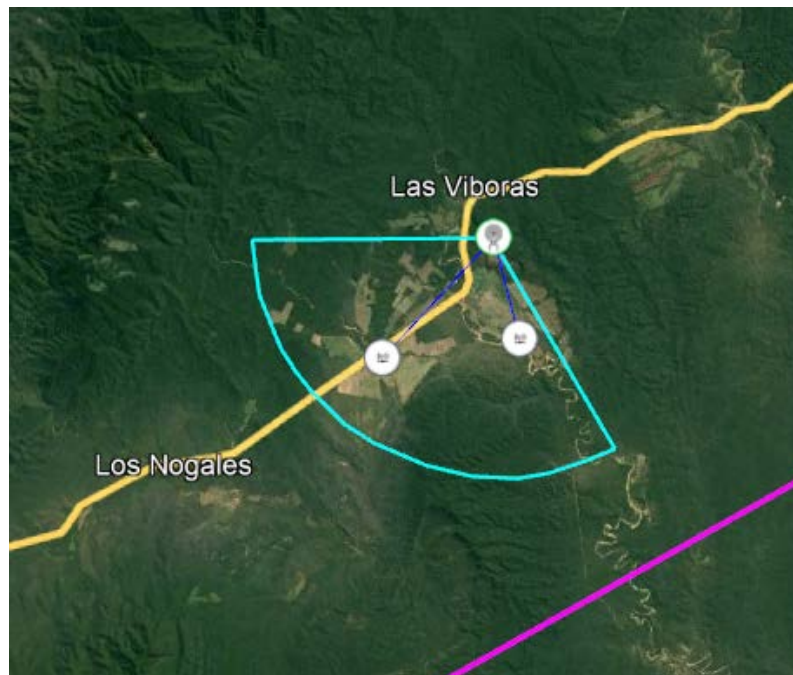
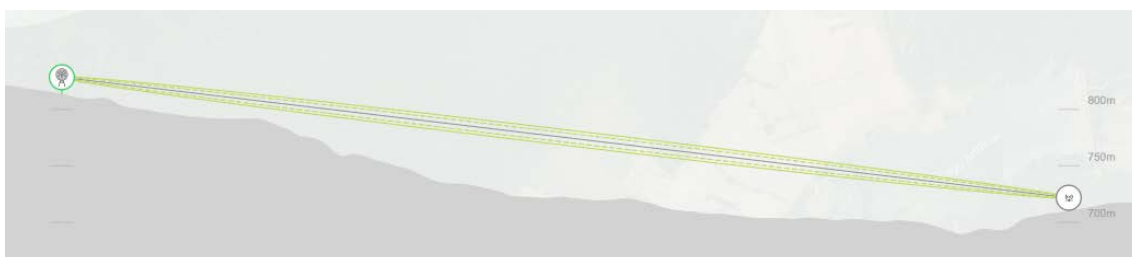


*Figura 12-7. Cobertura Zona 1 - Sitio 4*

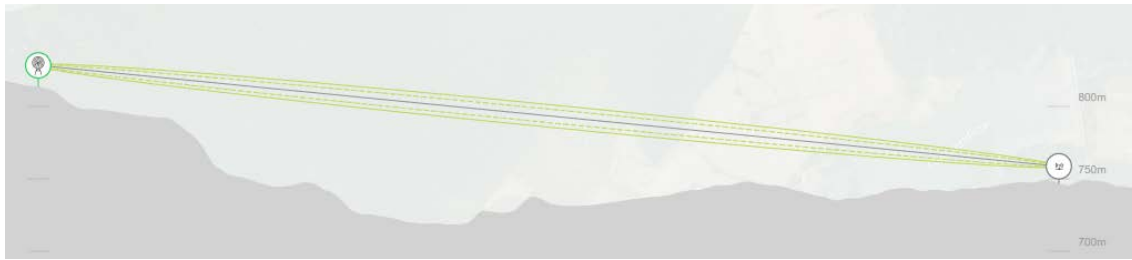
Por la complejidad de este sector fue necesario considerar la colocación de una antena sectorial que apunte directamente a las zonas requeridas, que, al ubicarse en zonas con alta depresión, fue imposible que reciban las señales de estaciones aledañas. La torre de 15m de altura se ubicó en las coordenadas -25.058137,-64.634769.

Las mediciones de línea de vista se realizaron sobre las posiciones según la Figura 12-7.

### *Línea de vista medición 1*



### *Línea de vista medición 2*



### **12.4.5. Sitio 5**

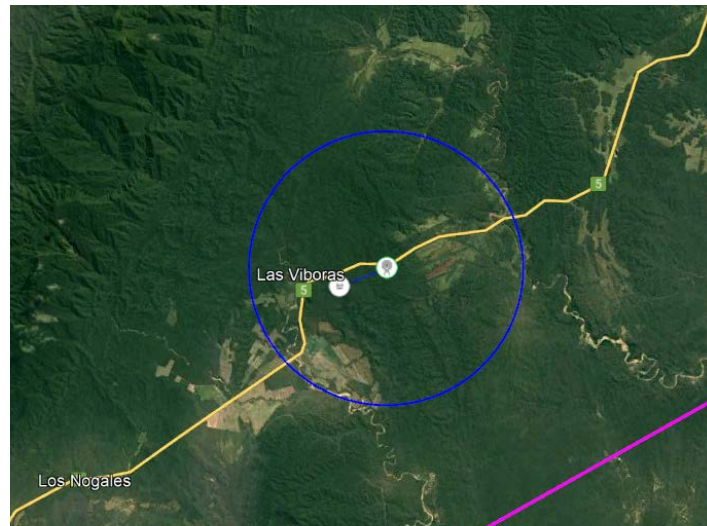


*Figura 12-8. Cobertura Zona 1 - Sitio 5*

Está ubicado en las coordenadas -25.044297,-64.609878 sobre una torre de 25m. Se realizó una sola medición de línea de vista sobre el único sector con productividad. Está previsto que cubra un radio de 5km.

### *Medición de línea de vista*



#### 12.4.6. Sitio 6

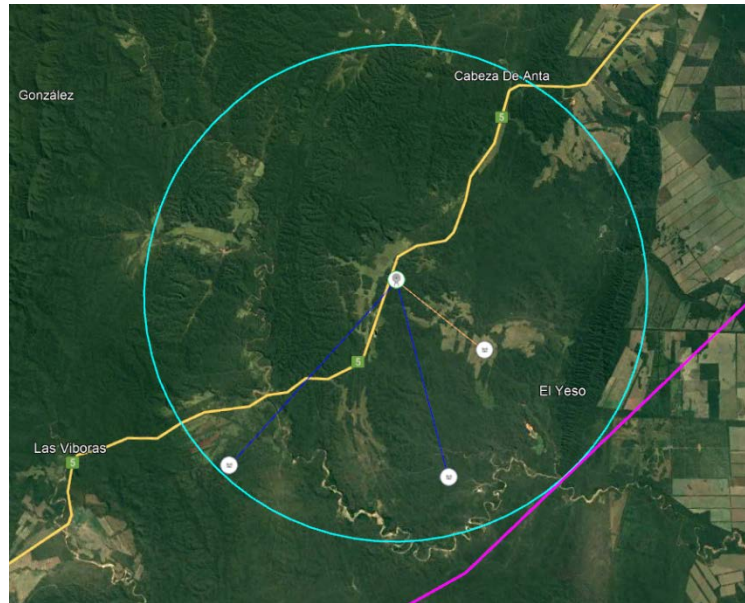


Figura 12-9. Cobertura Zona 1 - Sitio 6

Se ubicó en las coordenadas  $-24.99083, -64.512308$  sobre una torre de 12m. A partir de este sitio la geografía empieza a hacerse más llana, facilitando poco a poco la colocación de las antenas. Cubre un radio mínimo de 10km.

Se aseguró la cobertura al medir el perfil de elevación en tres puntos distintos, ubicados según la Figura 12-9.

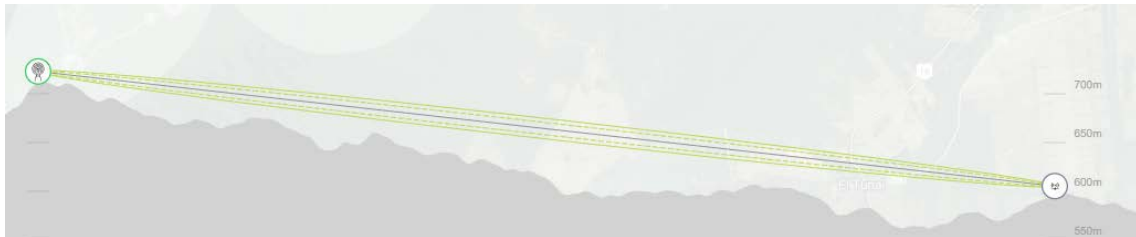
##### *Línea de vista según medición 1*



##### *Línea de vista según medición 2*



### Línea de vista según medición 3



#### 12.4.7. Sitio 7

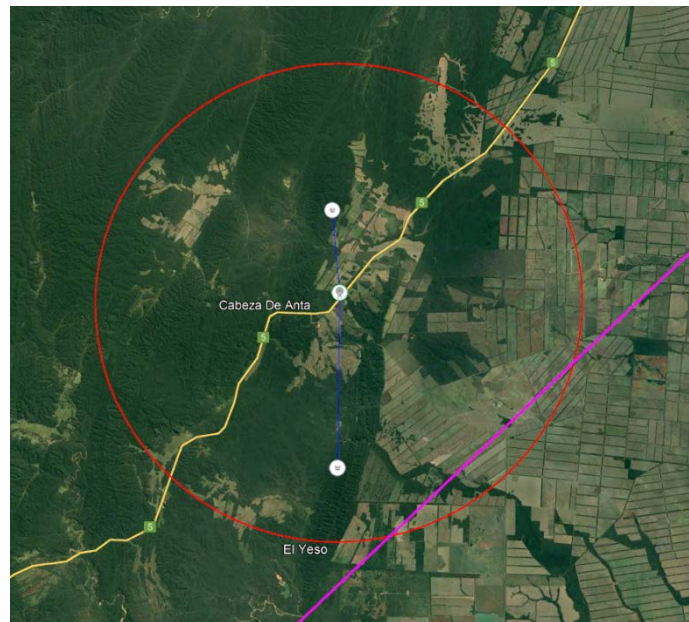


Figura 12-10. Cobertura Zona 1 - Sitio 7

Este sitio está ubicado en las coordenadas -24.912728,-64.425896 y se prevé que cubra un radio de 12km. También está previsto que tenga una antena omnidireccional montada sobre una torre de 25m.

Los puntos de medición de línea de vista son los que muestran la Figura 12-10.

### Línea de vista según medición 1



### Línea de vista según medición 2



#### 12.4.8. Sitio 8

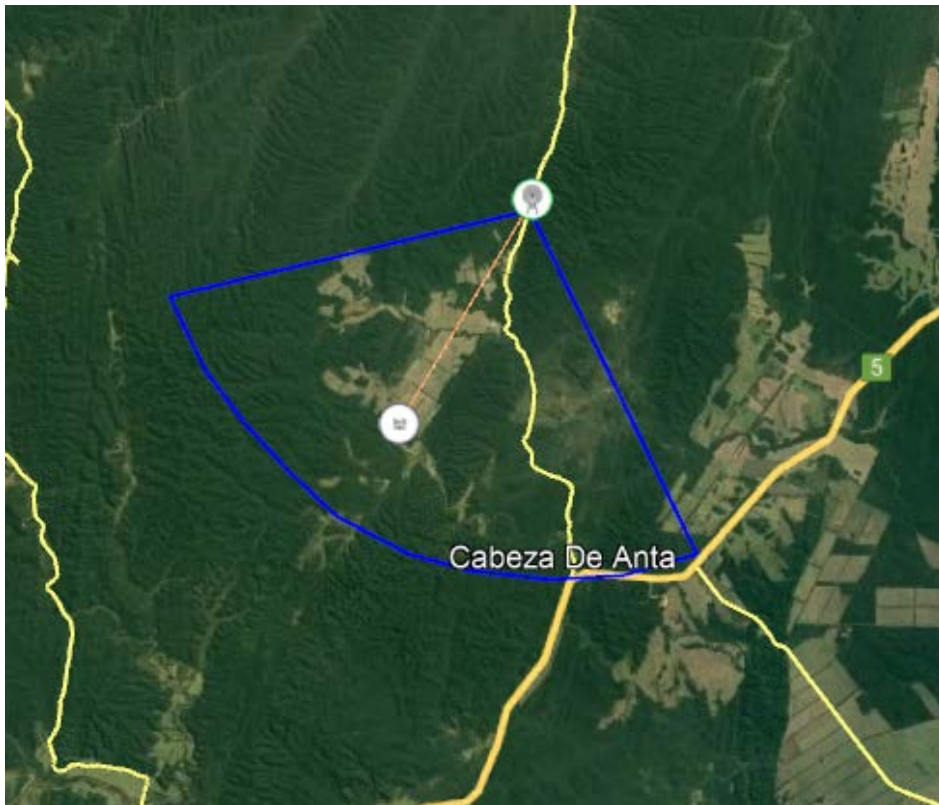


Figura 12-11. Cobertura Zona 1 - Sitio 8

Este sitio tiene la particularidad de estar equipado con una antena con patrón sectorial. Esto es así porque hay zonas productivas en esa área que, al estar en terreno elevado, no pueden acceder a la cobertura de otras estaciones. Está en las coordenadas -24.82858,-64.473224.

Se observó una sola línea de vista para el área en cuestión.

*Línea de vista según medición*



### 12.4.9. Sitio 9

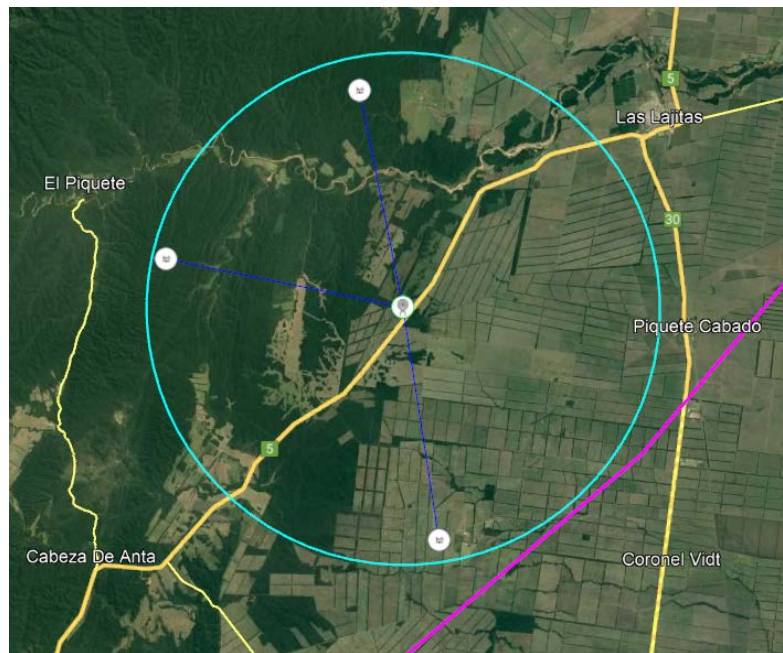
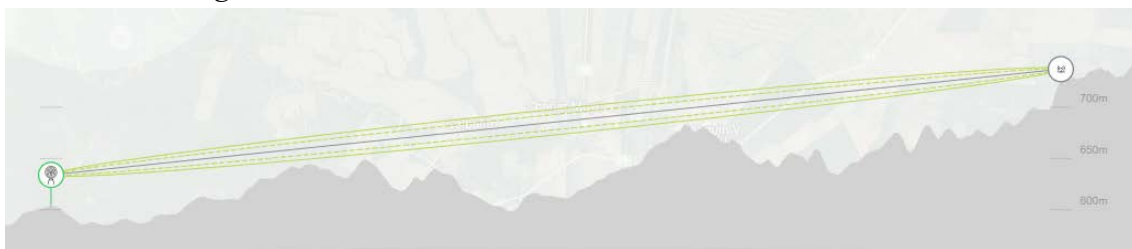


Figura 12-12. Cobertura Zona 1 - Sitio 9

Está ubicado en las coordenadas -24.808931,-64.316363 sobre una torre de 30m, para poder brindar cobertura a zonas elevadas cerca del área oeste donde hay una cadena montañosa. Está previsto que cubra un radio de 14km.

Se hicieron tres mediciones de perfil de elevación para garantizar la cobertura en el radio mencionado, según la Figura 12-12.

#### Línea de vista según medición 1



#### Línea de vista según medición 2



#### Línea de vista según medición 3



#### 12.4.10. Sitio 10

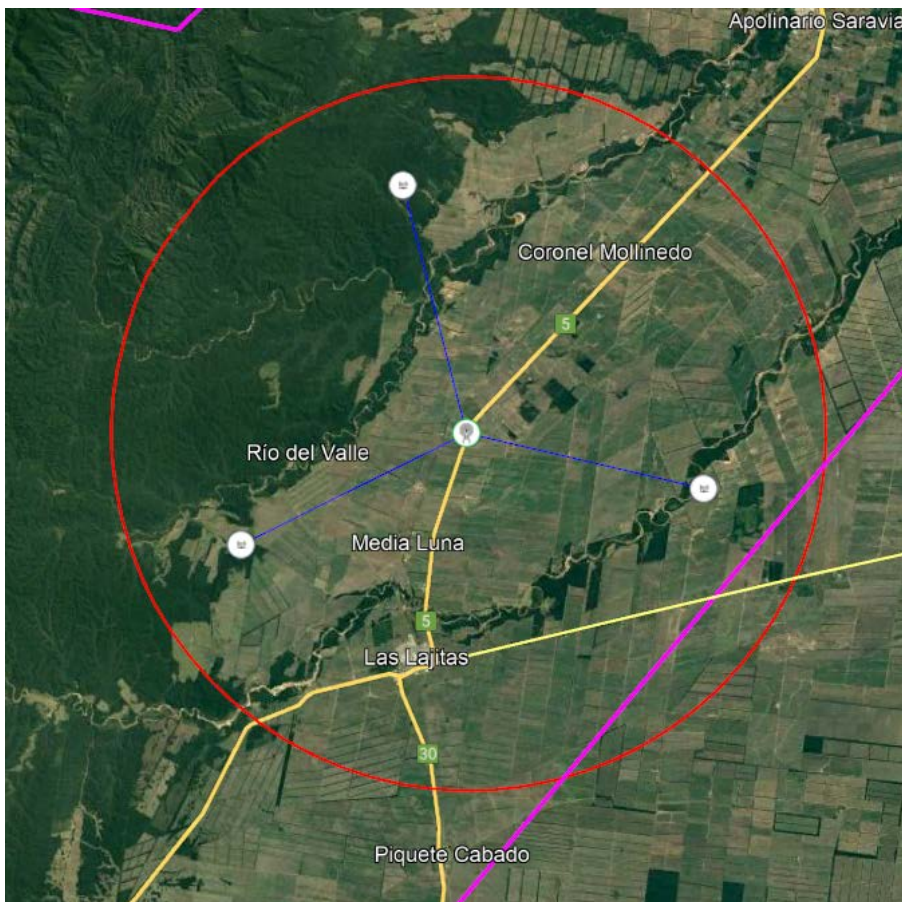
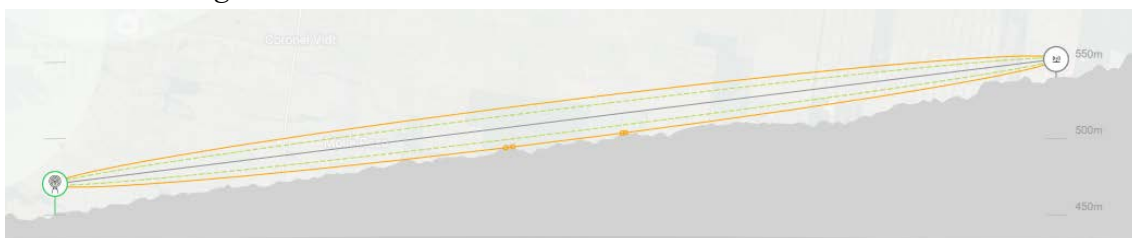


Figura 12-13. Cobertura Zona 1 - Sitio 10

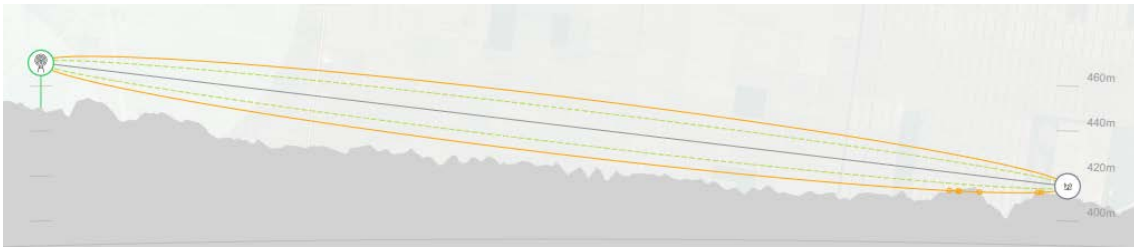
Está previsto que esté formado por una antena omnidireccional montada sobre una torre de 20m, lo que le permite cubrir un radio de 18km. Está ubicado en las coordenadas -24.624316,-64.168423.

Las mediciones de línea de vista se realizaron según la Figura 12-13.

#### Línea de vista según medición 1



*Línea de vista según medición 2*



*Línea de vista según medición 3*



**12.4.11. Sitio 11**

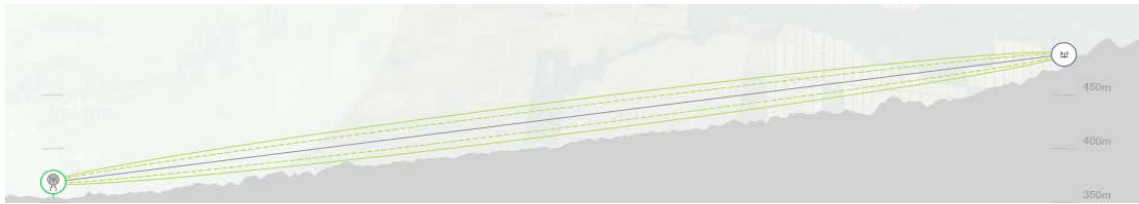


*Figura 12-14. Cobertura Zona 1 - Sitio 11*

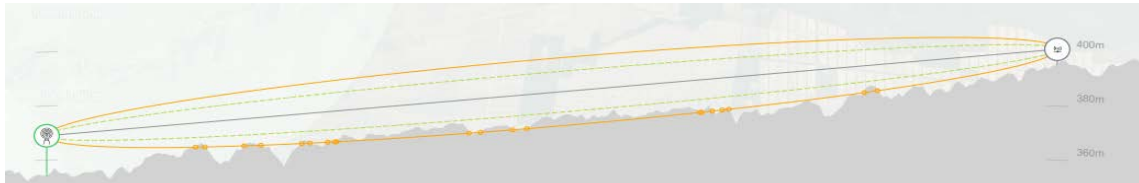
Ubicado en las coordenadas -24.401137,-63.989551, este sitio está previsto que cubra los 20km teóricos posibles. La antena omnidireccional estará montada en una torre de 25m.

Los perfiles de elevación se miden de acuerdo con la Figura 12-14.

*Línea de vista según medición 1*



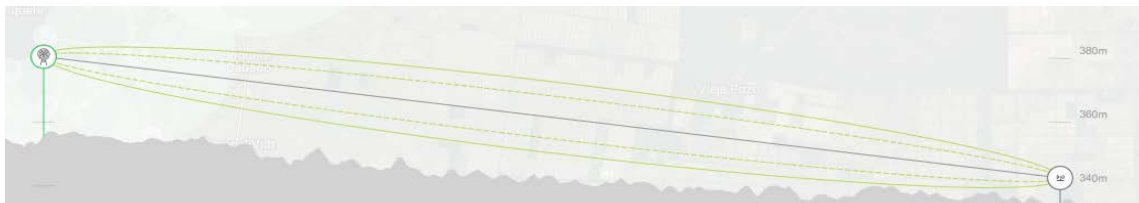
*Línea de vista según medición 2*



*Línea de vista según medición 3*



*Línea de vista según medición 4*



**12.4.12. Sitio 12**

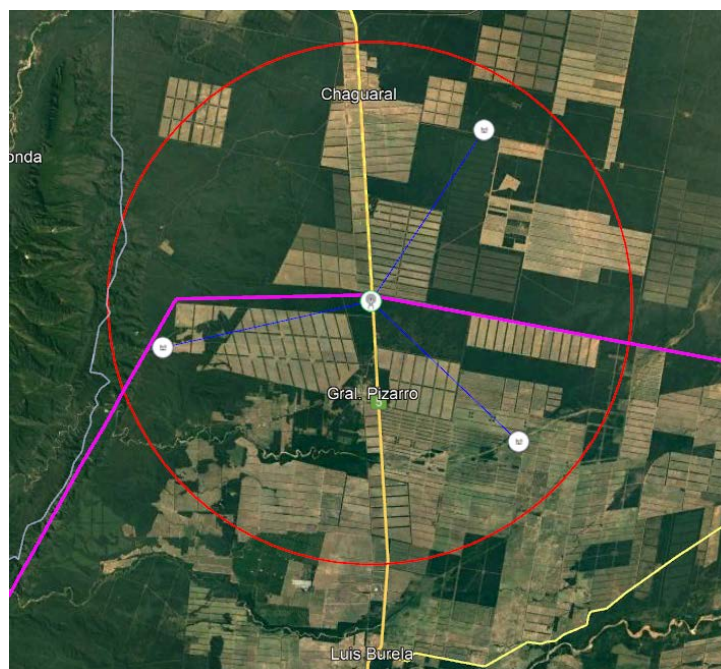


Figura 12-15. Cobertura Zona 1 - Sitio 12

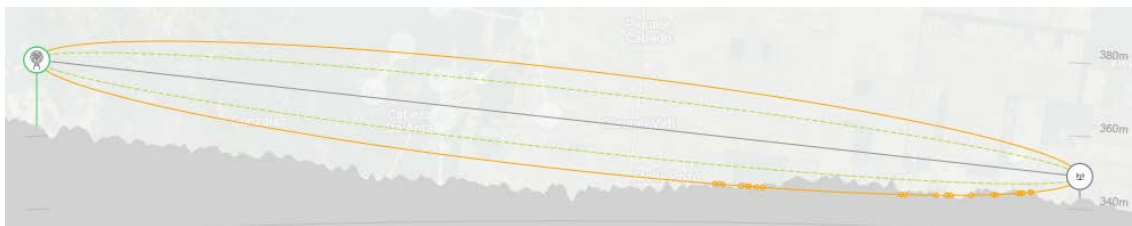
Ubicado en las coordenadas -24.171905,-63.987587, muy cerca del límite departamental, puede llegar a cubrir un radio de 18km con una antena montada sobre una torre de 15m.

Las mediciones de línea de vista se realizaron según la Figura 12-15.

#### *Línea de vista según medición 1*



#### *Línea de vista según medición 2*



#### *Línea de vista según medición 3*



### 12.4.13. Sitio 13

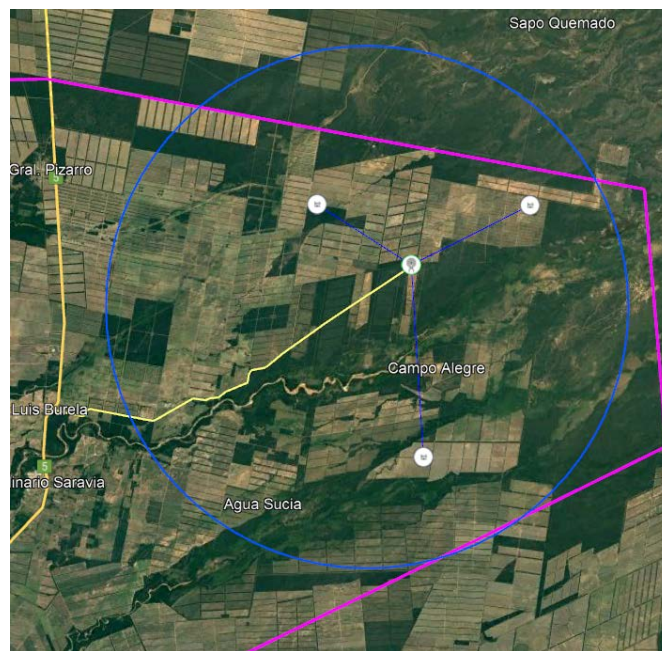


Figura 12-16. Cobertura Zona 1 - Sitio 13

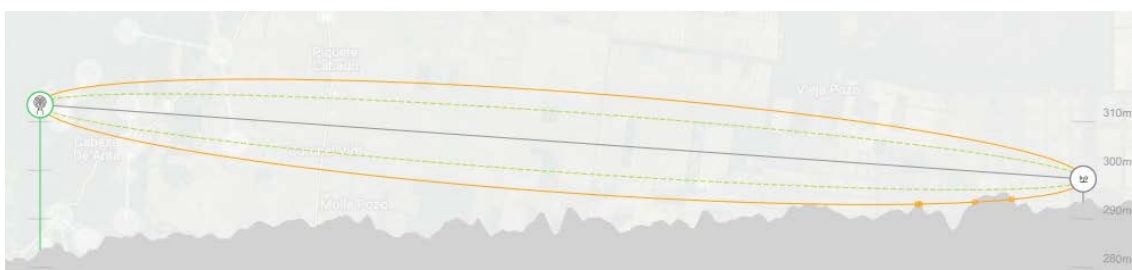
Este es el último sitio de la zona 1 y está en las coordenadas -24.291537,-63.72398. Está montado sobre una torre de 20m de altura, y puede cubrir hasta 19 km.

Las mediciones de línea de vista se hicieron según la Figura 12-16. Esto fue así debido a que el resto de la zona de cobertura también está contemplado por estaciones aledañas.

#### Línea de vista según medición 1



#### Línea de vista según medición 2



#### Línea de vista según medición 3



## 12.5. Zona 2

La zona 2 contiene 12 estaciones permanentes RTK, las cuales cubren todo el sector centro-norte del departamento de Anta.

La disposición y cobertura quedó según se ve en la Figura 12-17, y cada sitio fue enumerado de izquierda a derecha y de arriba abajo.

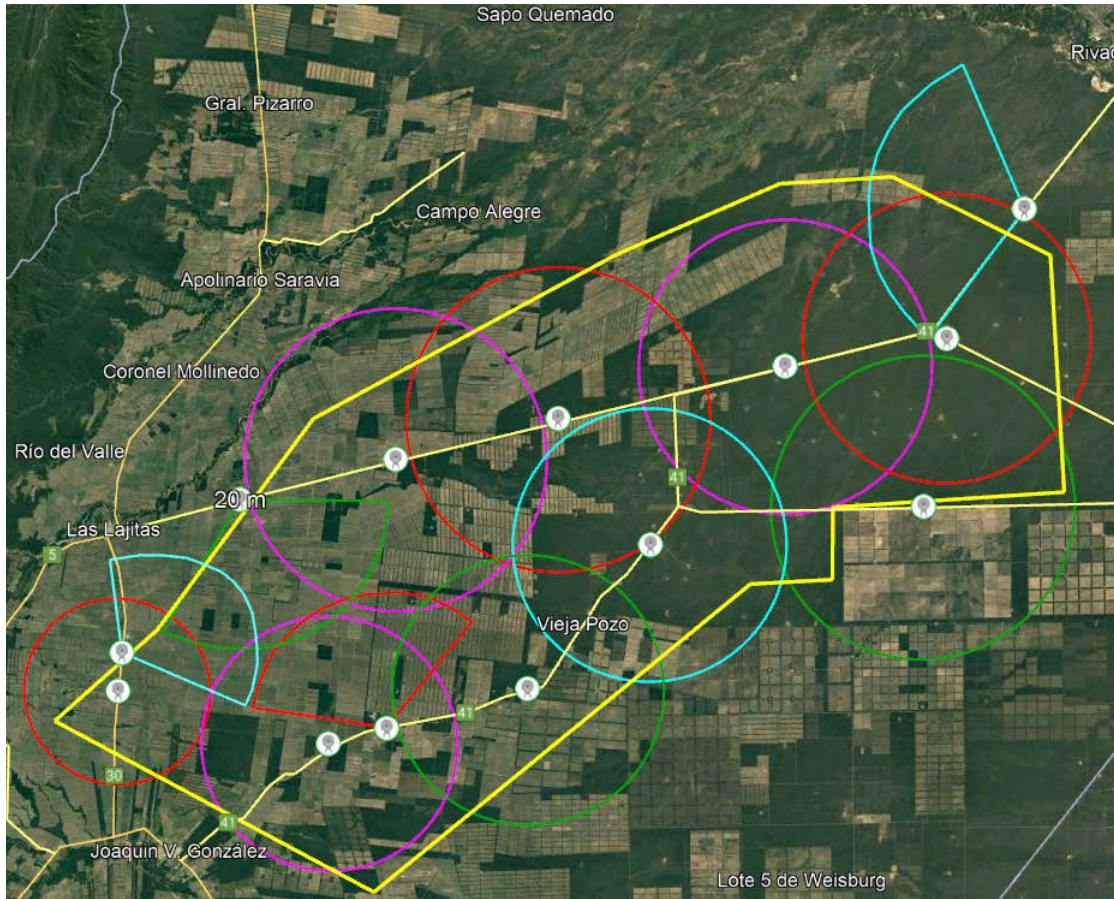


Figura 12-17. Cobertura Zona 2

### 12.5.1. Sitio 1

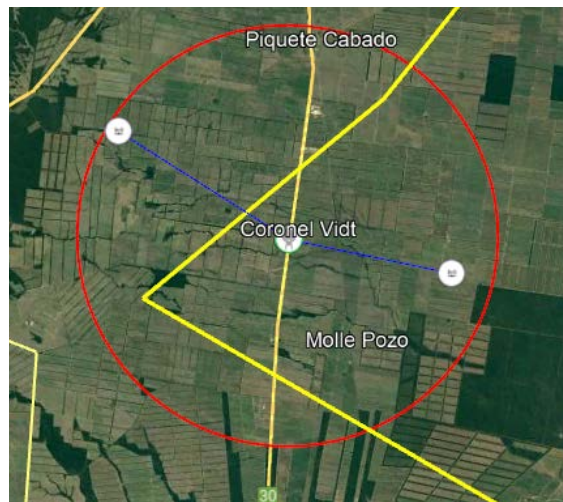


*Figura 12-18. Cobertura Zona 2 - Sitio 1*

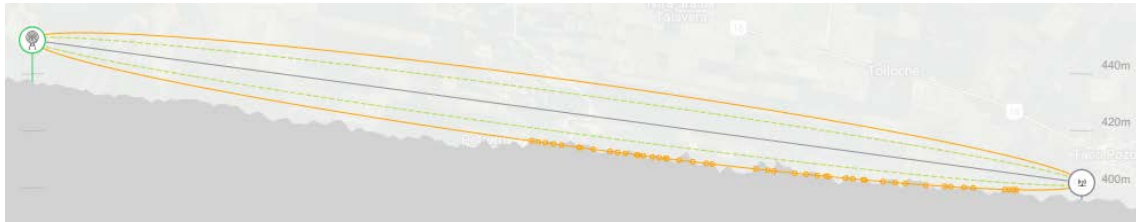
Está ubicado en las coordenadas -24.923871,-64.193581, en un pueblo llamado Coronel Vidt. Puede cubrir hasta un radio de 14km, con una torre de 12m de altura.

Las mediciones de línea de vista se realizaron según la Figura 12-18.

### *Línea de vista según medición 1*



### *Línea de vista según medición 2*



## 12.5.2. Sitio 2

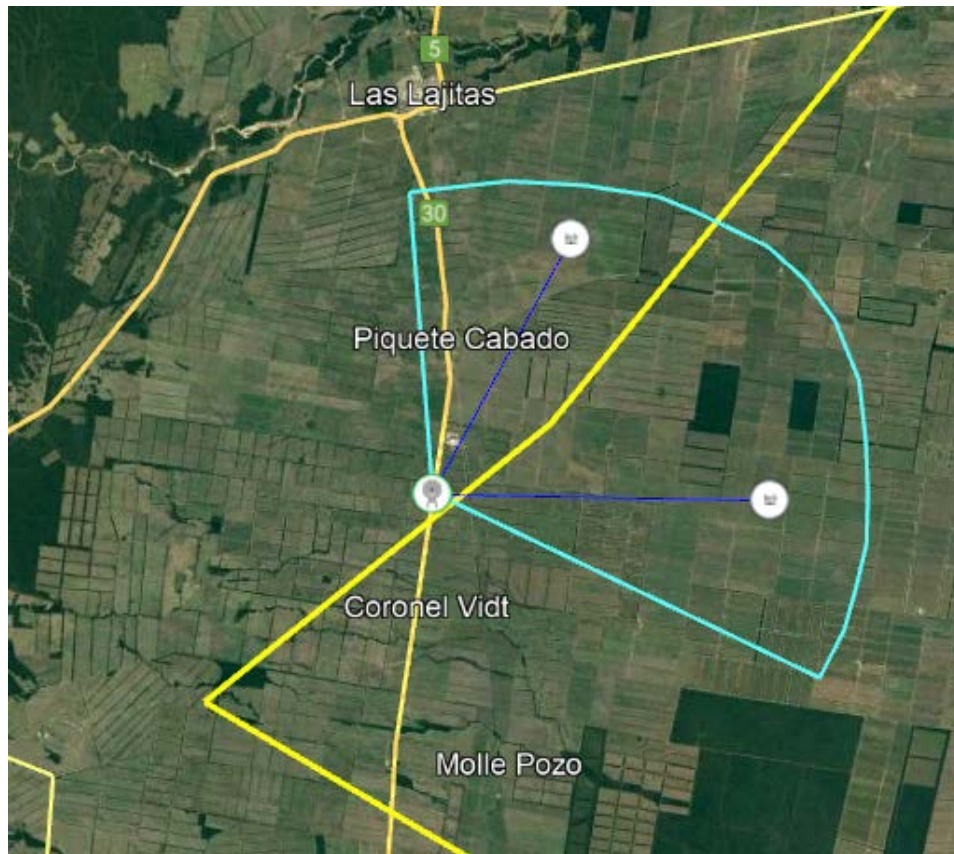


*Figura 12-19. Cobertura Zona 2 - Sitio 2*

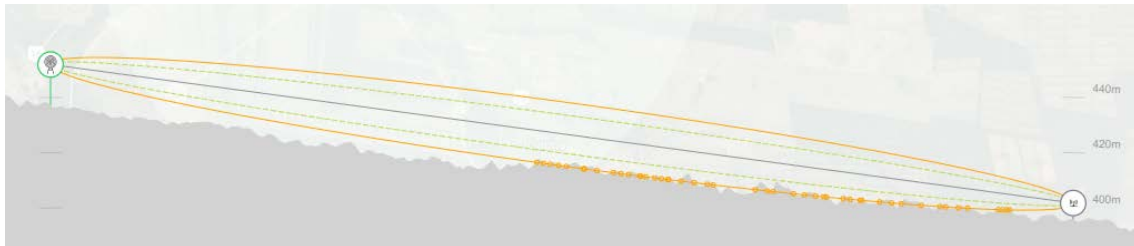
Está compuesto por una antena sectorial, montada en una torre de 15m. Sus coordenadas son -24.875914,-64.186714.

Los puntos testigo de línea de vista se muestran en la Figura 12-19.

### Línea de vista según medición 1



### Línea de vista según medición 2



### 12.5.3. Sitio 3

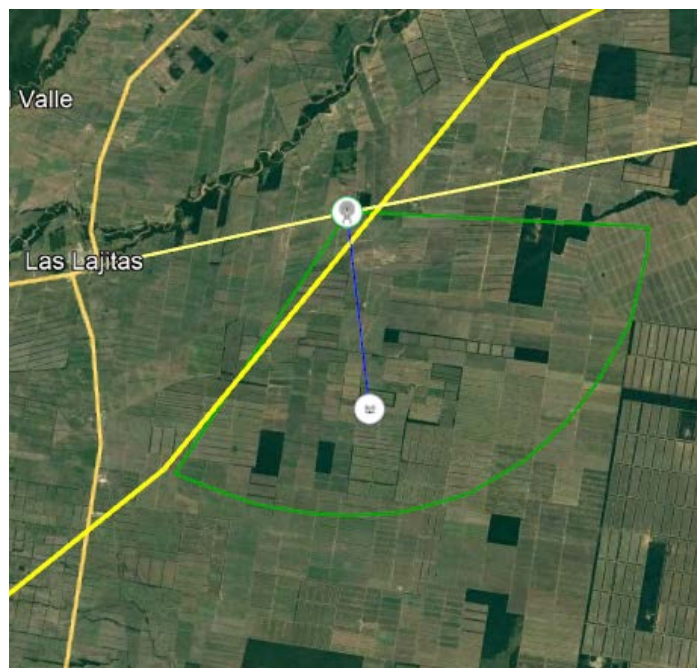
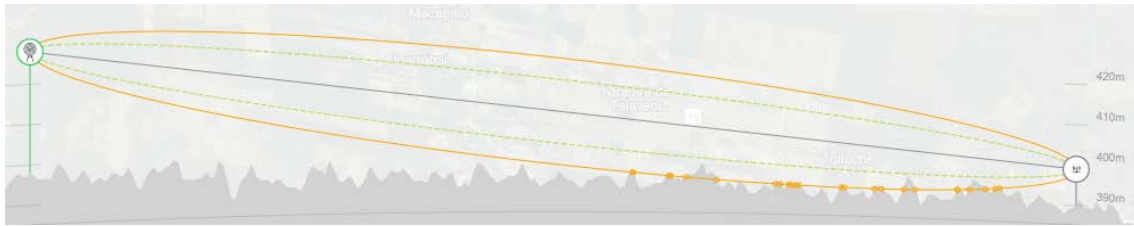


Figura 12-20. Cobertura Zona 2 - Sitio 3

Este sitio también está compuesto por una antena sectorial, sobre una torre de 20m. Sus coordenadas son -24.695123,-64.024257.

El punto testigo de línea de vista se muestra en la Figura 12-20.

### Línea de vista según medición



#### 12.5.4. Sitio 4



Figura 12-21. Cobertura Zona 2 - Sitio 4

Este sitio puede cubrir un radio de 20km. Está ubicado en las coordenadas -24.653387,-63.828007 y se propone que la antena esté sobre una torre de 20m.

Los dos puntos testigo de línea de vista se muestran en la Figura 12-21.

### Línea de vista según medición 1



### *Línea de vista según medición 2*



### **12.5.5. Sitio 5**

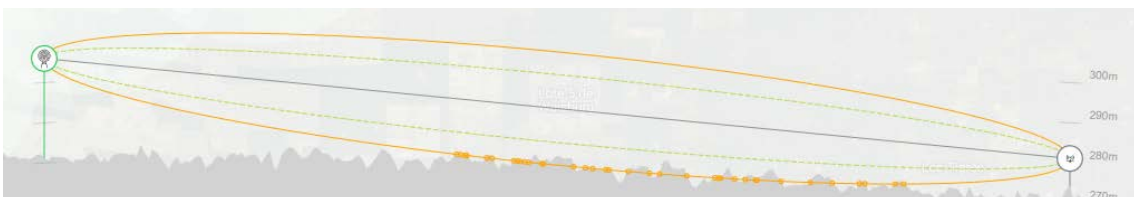


*Figura 12-22. Cobertura Zona 2 - Sitio 5*

Está ubicado en las coordenadas -24.608535,-63.606213. Se propone una torre de 20m para que tenga cobertura en un radio de 20km.

Se eligió un solo punto de medición de línea de, como muestra la Figura 12-22.

### *Línea de vista según medición*



### 12.5.6. Sitio 6

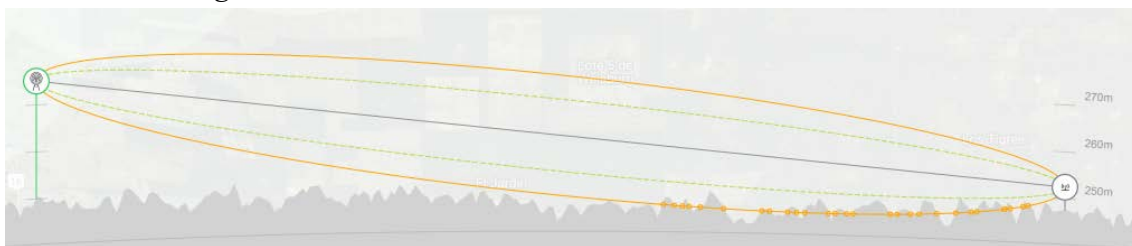


Figura 12-23. Cobertura Zona 2 - Sitio 6

Este sitio fue ubicado en las coordenadas -24.54859,-63.308209, sobre una torre de 20m. Tiene un alcance teórico de 20km.

Los sitios testigo de línea de vista se muestran en la Figura 12-23.

#### *Línea de vista según medición 1*



#### *Línea de vista según medición 2*



### 12.5.7. Sitio 7

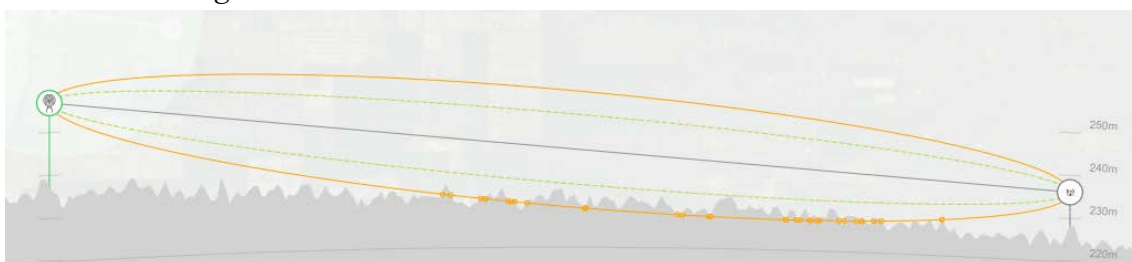


Figura 12-24. Cobertura Zona 2 - Sitio 7

Se previó que en este sitio vaya instalada una antena omnidireccional en una torre de 20m de altura, en las coordenadas -24.51879,-63.097879. Puede cubrir un radio de 18km.

Las medidas sobre la línea de vista testigo se hizo según la Figura 12-24.

*Línea de vista según la medición*



### 12.5.8. Sitio 8

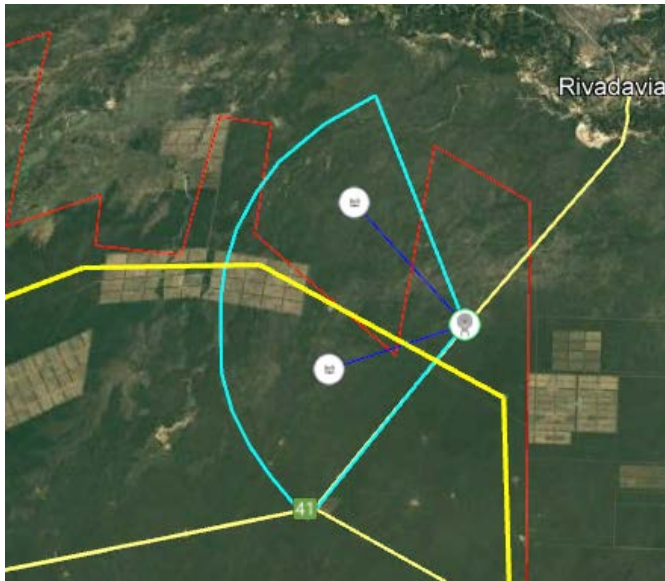
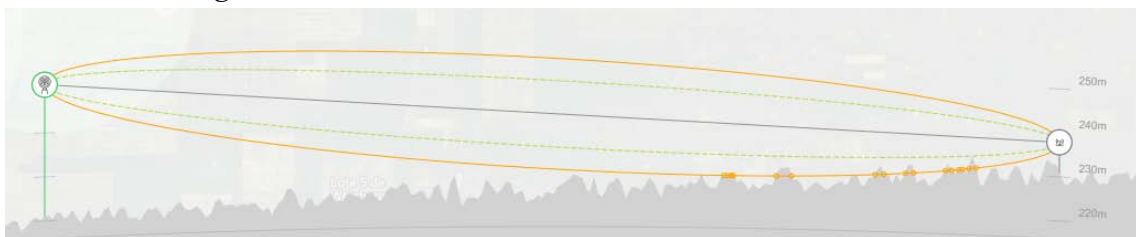


Figura 12-25. Cobertura Zona 2 - Sitio 8

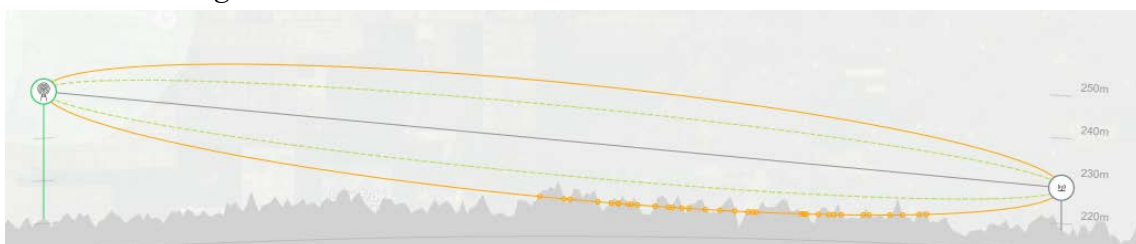
Esta ubicación se pensó con el objetivo de llegar a zonas que con el resto de las antenas omnidireccionales era imposible llegar. Se optó por una antena con patrón sectorial debido a la cercanía del límite departamental. Sus coordenadas son -24.367886,-62.996925.

Los puntos de medición de perfiles de elevación se muestran en la Figura 12-25.

#### *Línea de vista según la medición 1*



#### *Línea de vista según la medición 2*



### 12.5.9. Sitio 9



Figura 12-26. Cobertura Zona 2 - Sitio 9

Desde este sitio en adelante, las antenas son ubicadas al costado de la ruta provincial 41. Particularmente, este está en las coordenadas -24.98783,-63.898601 y cuenta con una torre de 20m de altura.

Se hicieron dos medidas de referencia de nivel de elevación, en las posiciones que muestra la figura 12-26.

*Línea de vista según la medición 1*

*Línea de vista según la medición 2*

### 12.5.10. Sitio 10

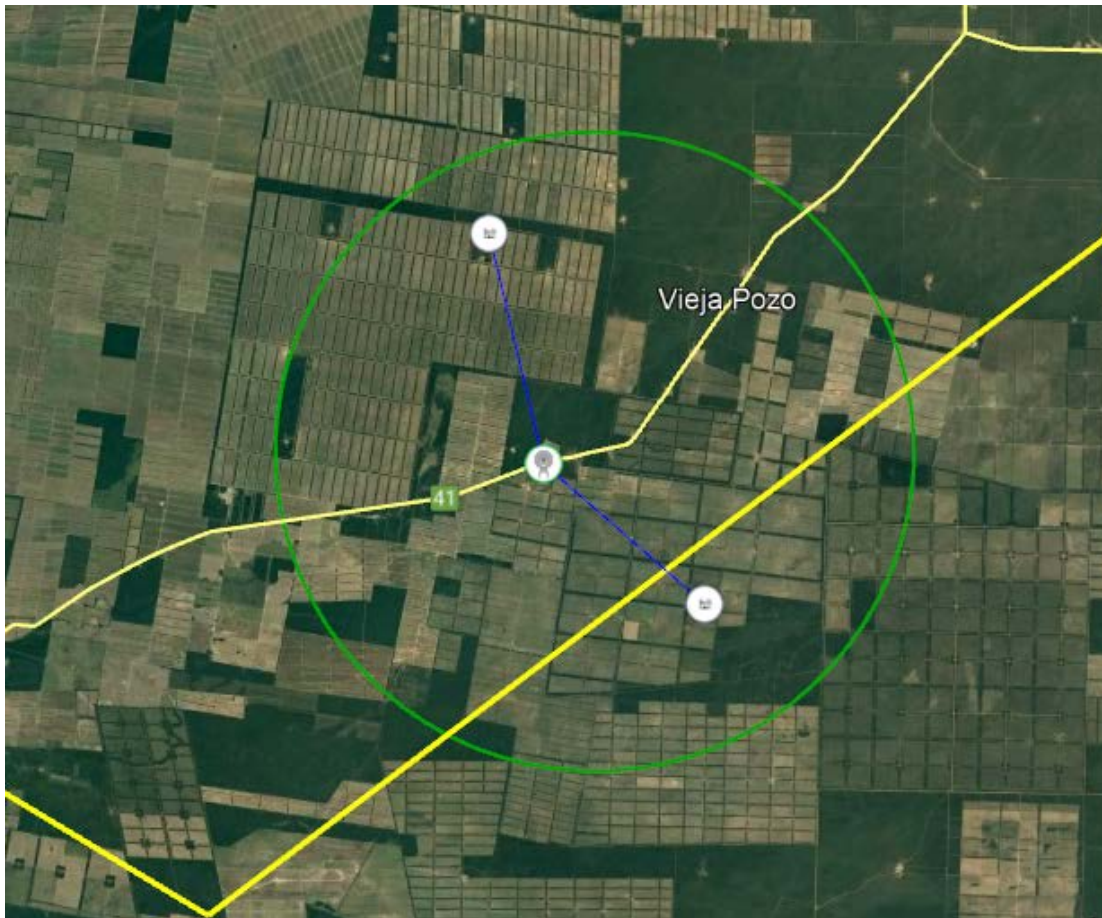


Figura 12-27. Cobertura Zona 2 - Sitio 10

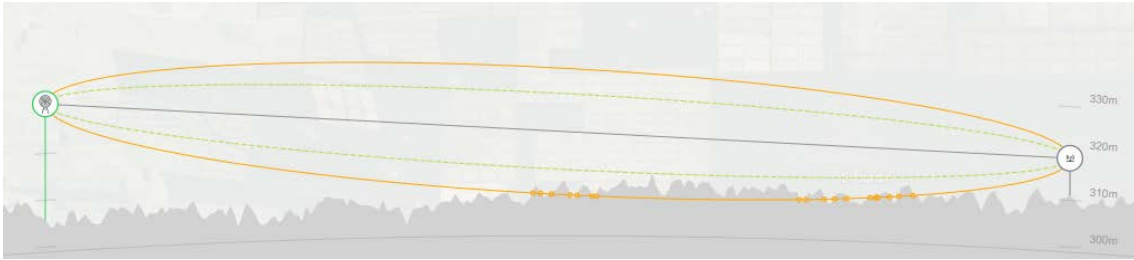
Ubicado en las coordenadas -24.936629,-63.678703, el sitio 10 tiene previsto contar con una antena omnidireccional montada en una torre de 20m. Al estar ubicado en una zona muy llana, es posible cubrir por lo mínimo una distancia de 20km.

Las pruebas de perfil de elevación se realizaron conforme a la Figura 12-27.

*Línea de vista según la medición 1*



*Línea de vista según la medición 2*



**12.5.11. Sitio 11**

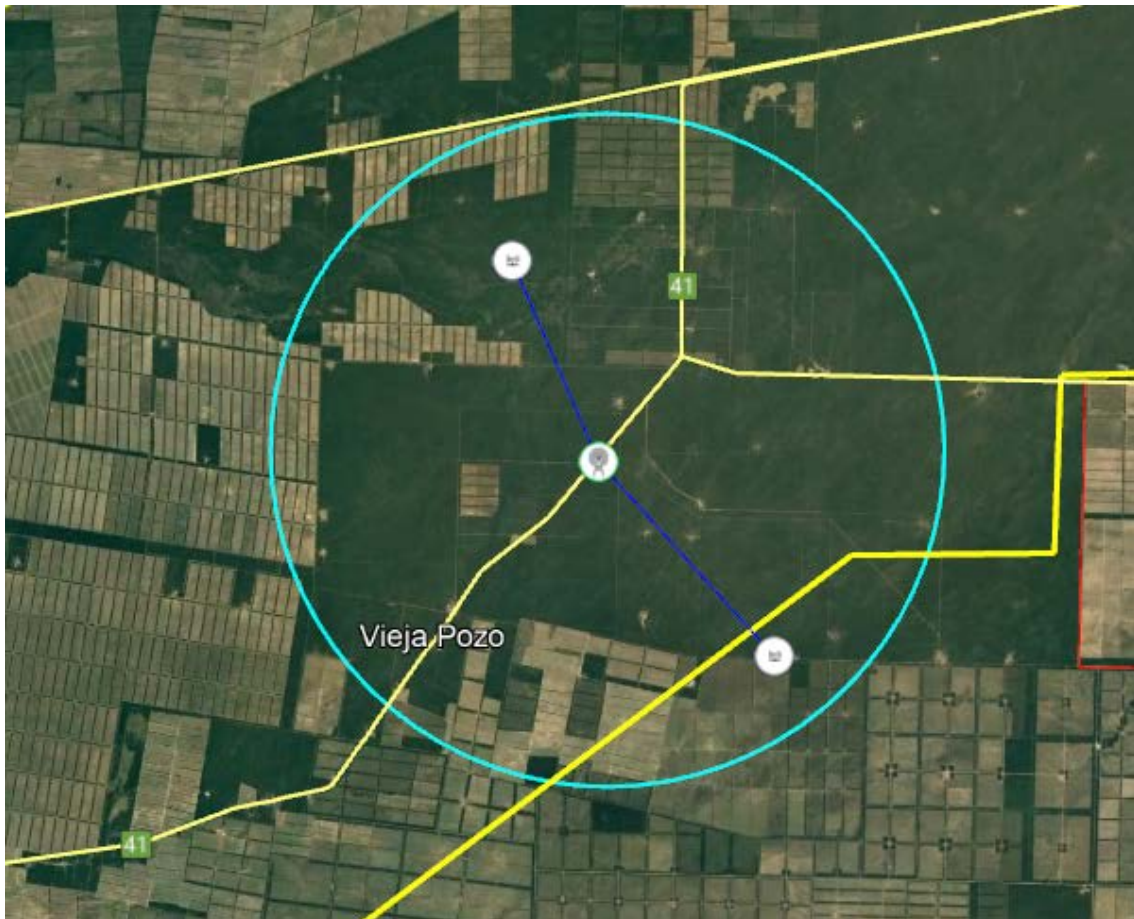
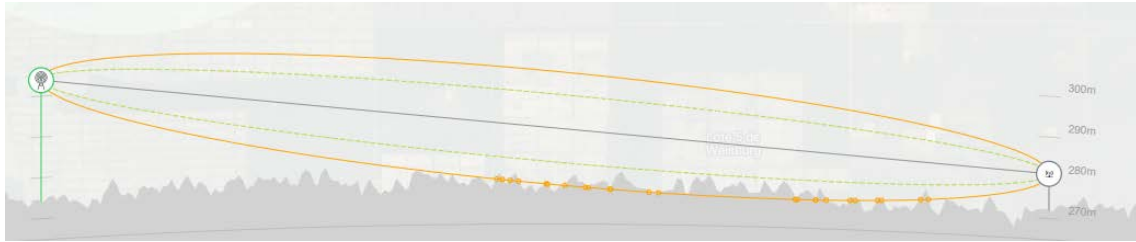


*Figura 12-28. Cobertura Zona 2 - Sitio 11*

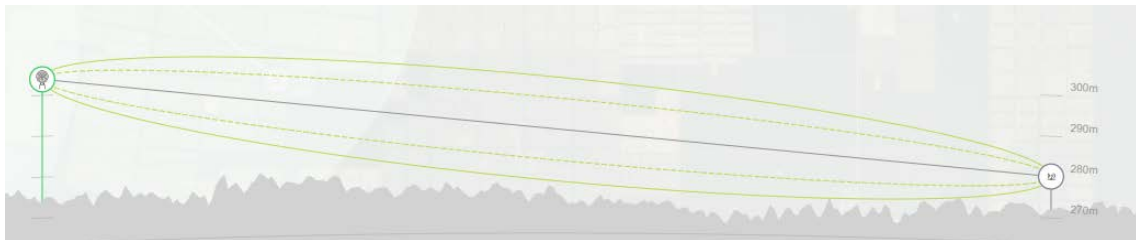
La antena omnidireccional montada en una torre de 20m permite un radio de cobertura entre 18 y 20 kilómetros. Está ubicado en las coordenadas -24.764039,-63.491935.

Las pruebas de cobertura se realizaron en los puntos según la Figura 12-28.

*Línea de vista según medición 1*



*Línea de vista según medición 2*



**12.5.12. Sitio 12**

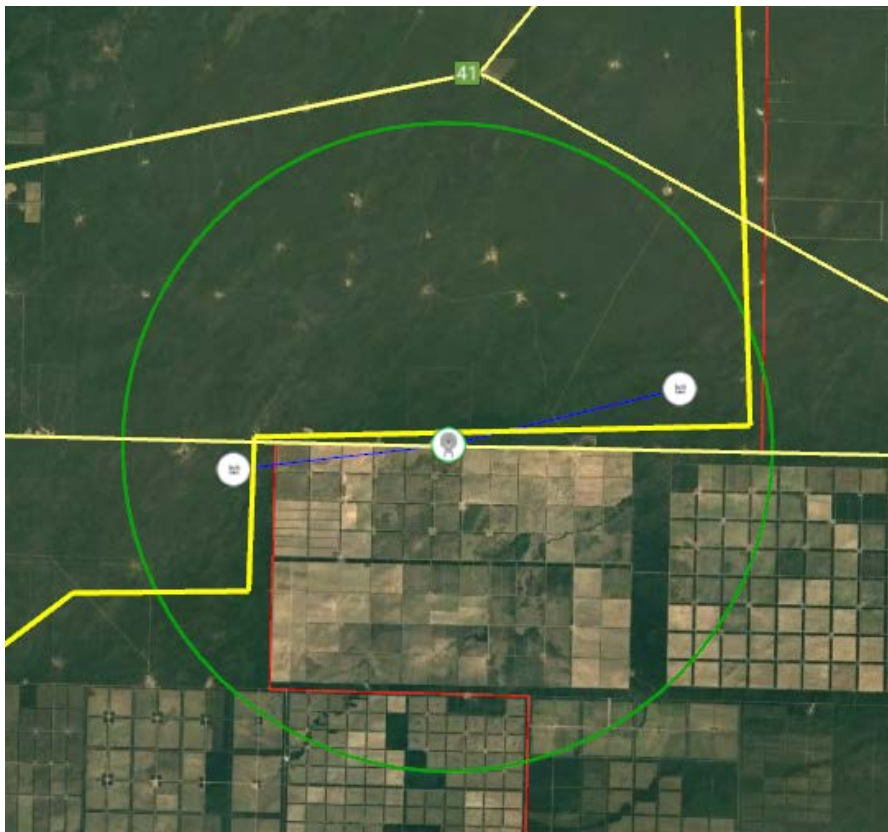
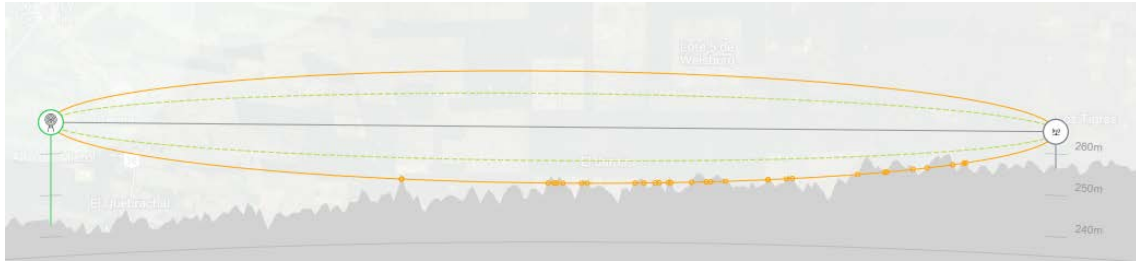


*Figura 12-29. Cobertura Zona 2 - Sitio 12*

Este sitio está ubicado en el límite departamental. Fue necesario para cubrir bordes de zonas muy productivas de la región. Está ubicado en las coordenadas -24.717147,-63.128424, y puede cubrir una distancia de 20km con una torre de 25m de altura.

Se aseguró la cobertura midiendo líneas de vista en dos puntos importantes, según muestra la Figura 12-29.

### Línea de vista según medición 1



### Línea de vista según medición 2



## 12.6. Zona 3

En esta zona se consideró toda la región sur del departamento de Anta, incluida su cabecera Joaquín V. González. Incluye 10 estaciones permanentes RTK, las cuales fueron enumeradas de izquierda a derecha. Su mapa de cobertura queda expuesto en la Figura 12-30.

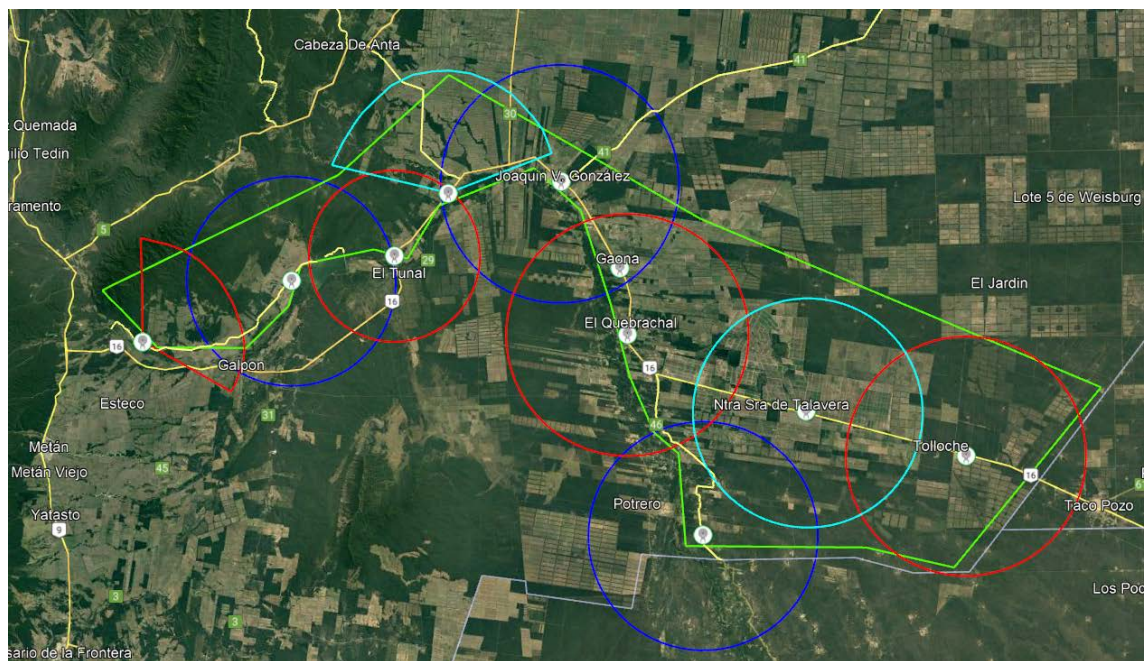


Figura 12-30. Cobertura Zona 3

### 12.6.1. Sitio 1

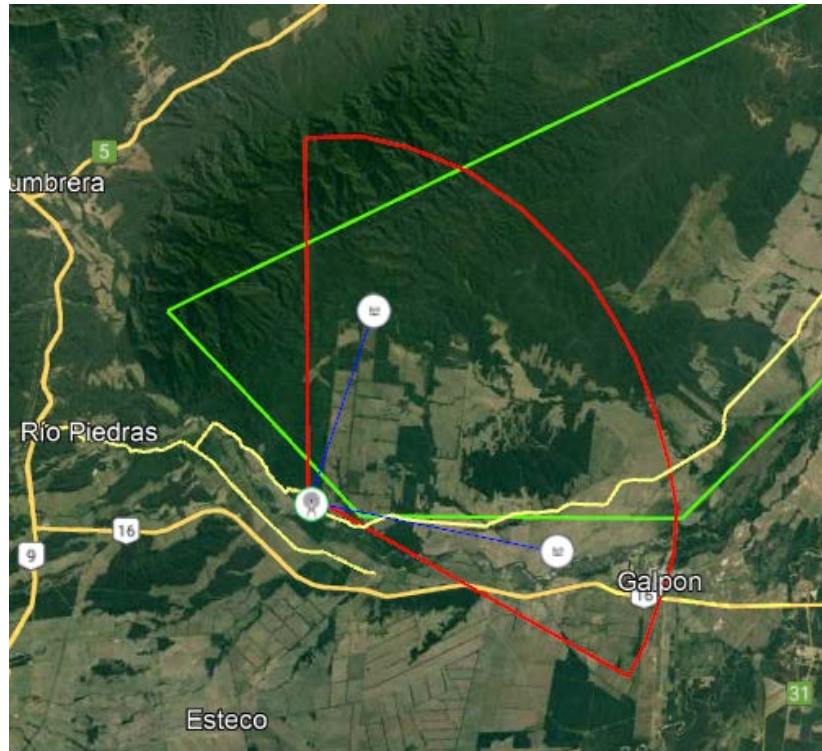
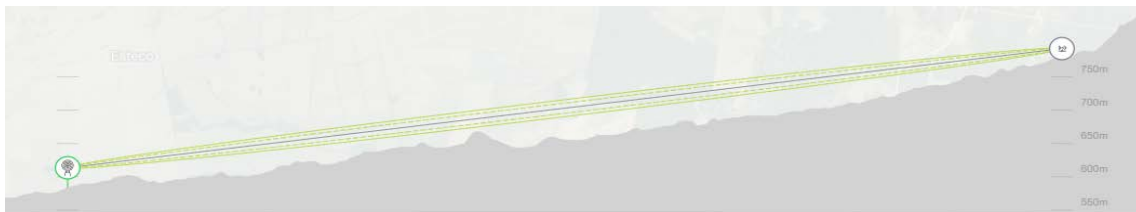


Figura 12-31. Cobertura Zona 3 - Sitio 1

El primer sitio de esta zona está ubicado en el sector suroeste del departamento de Anta, en las coordenadas -25.343749,-64.810042. Se recomienda una torre de 30m de altura debido a la complejidad de la zona productiva en ese sector, ya que posee muchas zonas elevadas a las que no se puede tener acceso por caminos estatales o provinciales.

Los puntos testigo de cobertura se muestran en la Figura 12-31.

#### Línea de vista según medición 1



### *Línea de vista según medición 2*



### **12.6.2. Sitio 2**

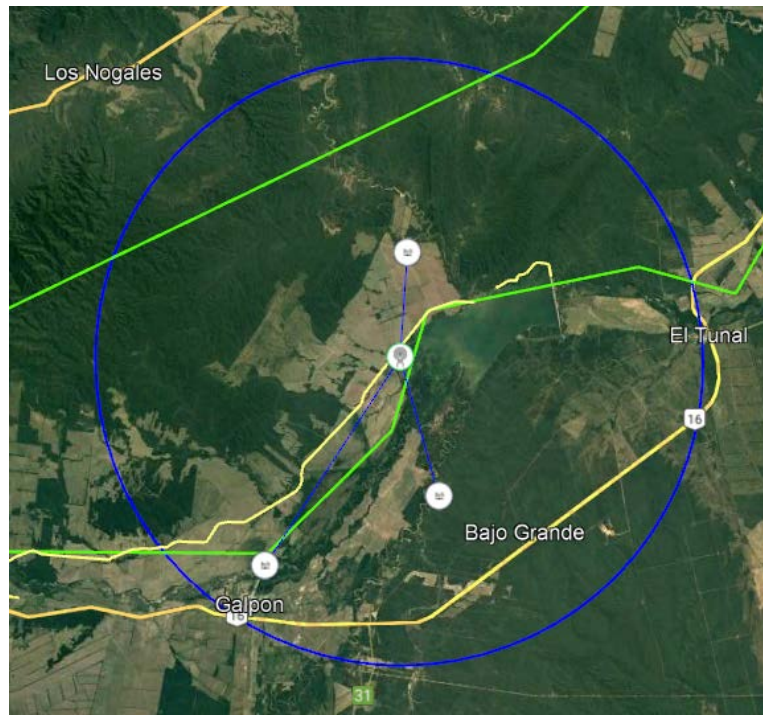
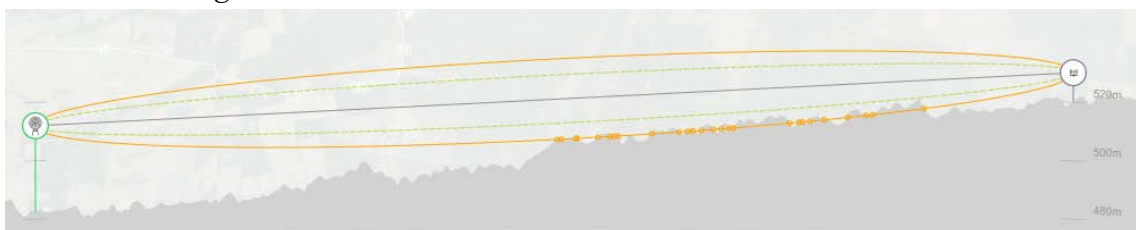


*Figura 12-32. Cobertura Zona 3 - Sitio 2*

Este sitio se encuentra al costado del Dique El Tunal, en las coordenadas -25.260107,-64.564158. Tiene una muy buena cobertura, de aproximadamente 18km, utilizando una torre de 25m.

Los puntos muestra de línea de vista se miden según la Figura 12-32.

### *Línea de vista según medición 1*



*Línea de vista según medición 2*



*Línea de vista según medición 3*



**12.6.3. Sitio 3**

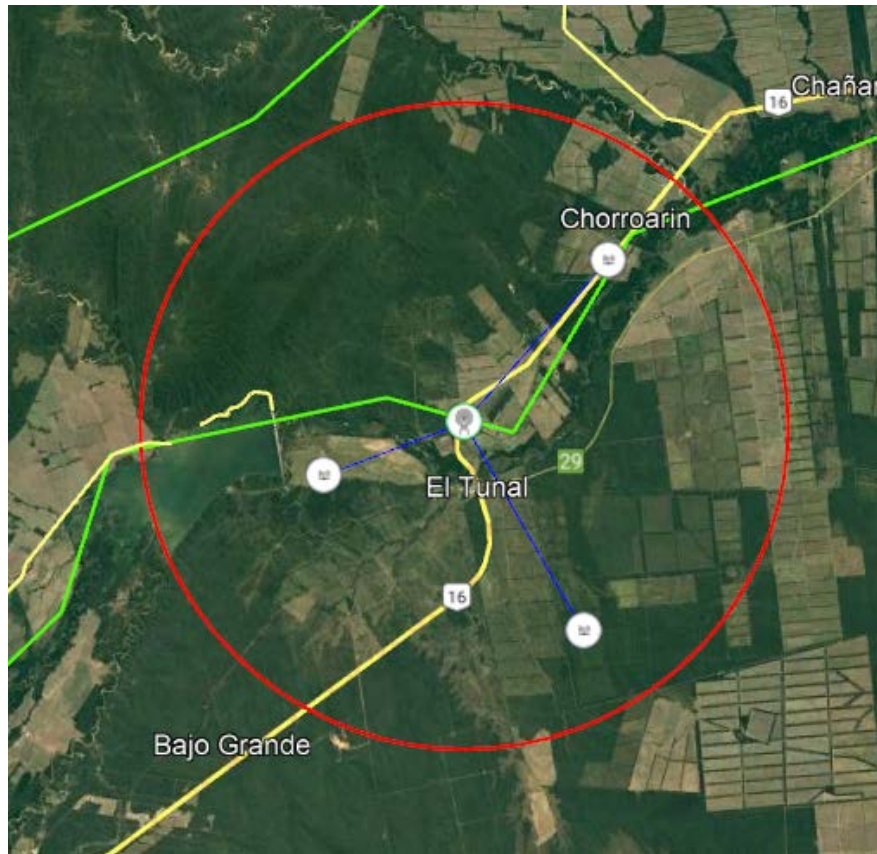


*Figura 12-33. Cobertura Zona 3 - Sitio 3*

Se ubica en las coordenadas -25.227812,-64.396021. Se prevé que cubra un radio de 15km, utilizando una torre de 12 m.

Los puntos de medición de línea de vista se ubicaron según la Figura 12-33.

*Línea de vista según medición 1*



*Línea de vista según medición 2*



*Línea de vista según medición 3*



#### 12.6.4. Sitio 4

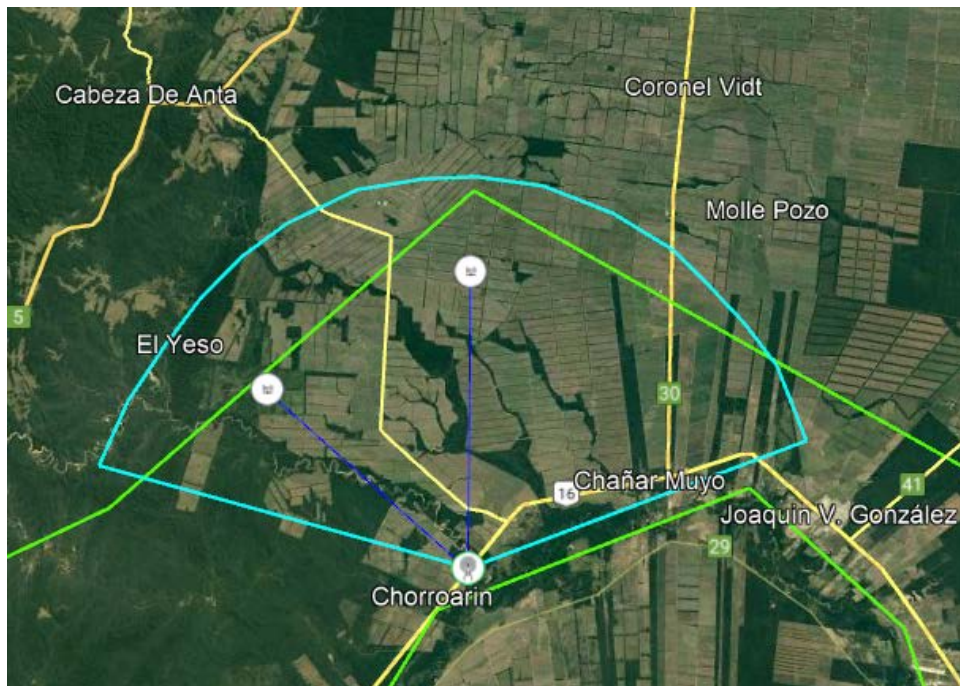


Figura 12-34. Cobertura Zona 3 - Sitio 4

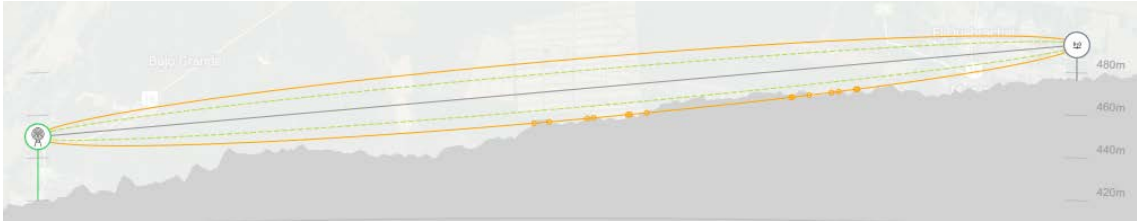
Ubicado en las coordenadas -25.138514,-64.306191 ofrece una cobertura sectorial en zonas donde no se llegaba con el resto de las antenas omnidireccionales. Se prevé que se instale en una torre de 25m.

Los puntos de medición de cobertura se muestran en la Figura 12-34.

*Línea de vista según medición 1*



*Línea de vista según medición 2*



### 12.6.5. Sitio 5

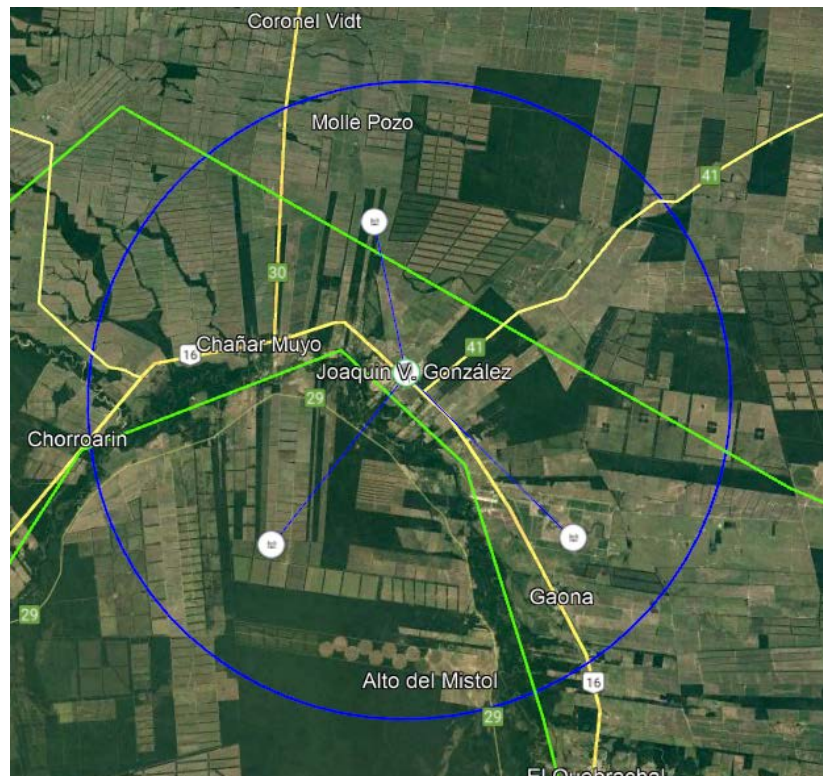


Figura 12-35. Cobertura Zona 3 - Sitio 5

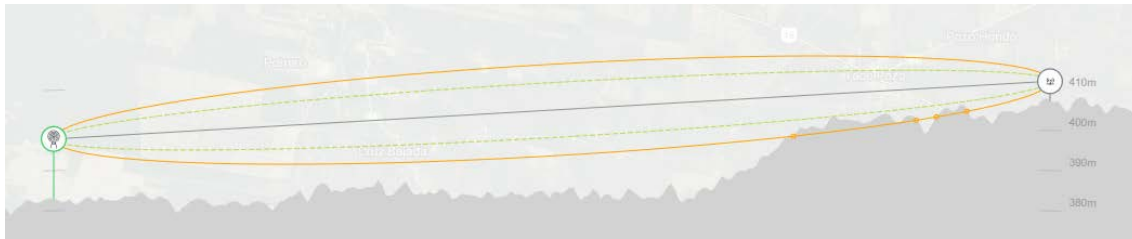
Ubicado en la ciudad cabecera de Anta, este sitio está en las coordenadas -25.125452,-64.123134, pertenecientes a Joaquín V. González. Está previsto que la antena omnidireccional se monte sobre una torre de 12 m, dando un radio de cobertura de 20 km.

Los puntos testigo de la medición de cobertura se muestran en la Figura 12-35.

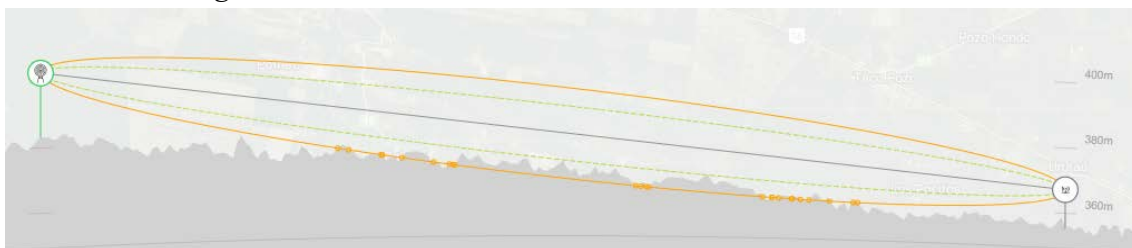
*Línea de vista según medición 1*



*Línea de vista según medición 2*



*Línea de vista según medición 3*



**12.6.6. Sitio 6**

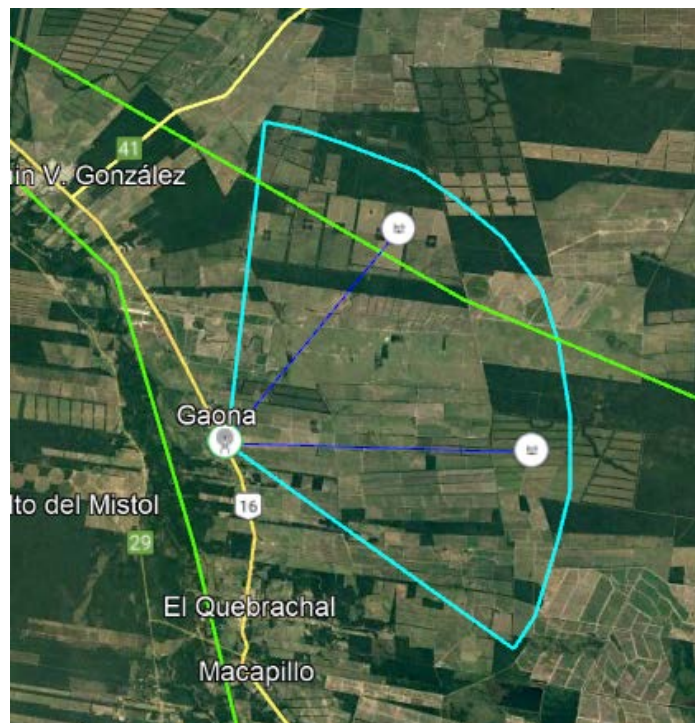


*Figura 12-36. Cobertura Zona 3 - Sitio 6*

Este sitio se montó para lograr cobertura en una pequeña zona donde otras estaciones no podían llegar. Al costado de la ruta nacional 16, en las coordenadas

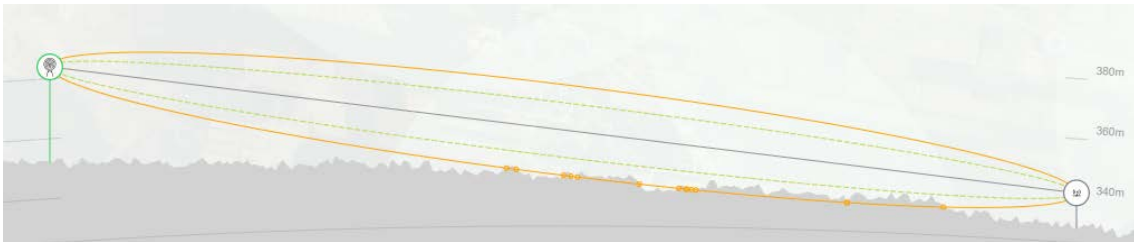
-25.254157,-64.031686 se plantea instalar una torre de 12 m de altura, para poder montar allí una antena omnidireccional.

Los puntos muestra de cobertura se muestran en la Figura 12-36.

#### *Línea de vista según medición 1*



#### *Línea de vista según medición 2*



#### **12.6.7. Sitio 7**

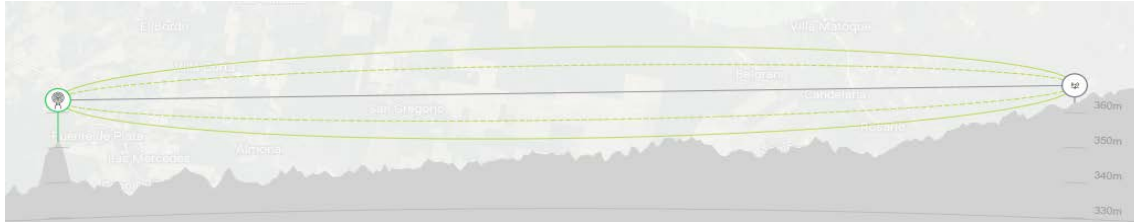


Figura 12-37. Cobertura Zona 3 - Sitio 7

Está ubicado en las coordenadas -25.351602,-64.021963 y cuenta con una torre de 12 m. Está previsto que brinde cobertura en un radio de 20 km.

Los tres puntos muestra de cobertura se muestran en la Figura 12-37.

#### *Línea de vista según medición 1*



#### *Línea de vista según medición 2*



#### *Línea de vista según medición 3*



### 12.6.8. Sitio 8

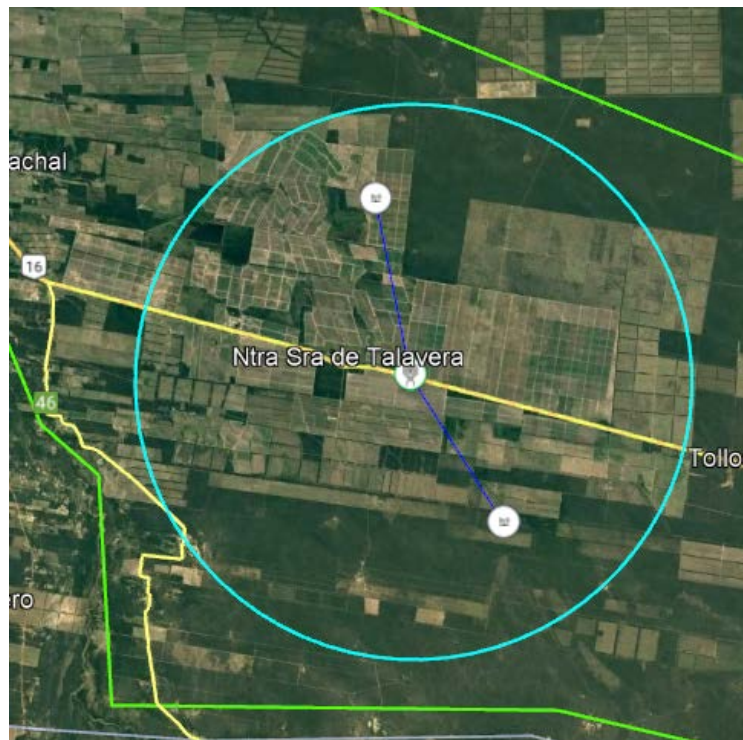
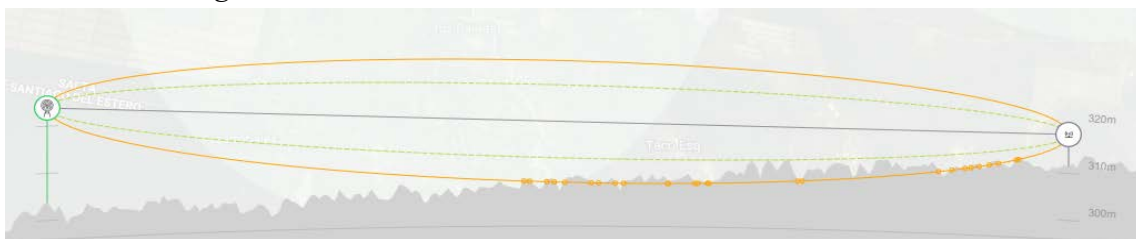


Figura 12-38. Cobertura Zona 3 - Sitio 8

Al costado de la ruta nacional 16, en las coordenadas -25.469568,-63.735928 y con una torre de 12 m de altura, se prevé que el sitio 8 brinde cobertura en un radio de 18 km.

Los puntos muestra de cobertura por medio de línea de vista se muestran en la Figura 12-38.

#### Línea de vista según medición 1



#### Línea de vista según medición 2



### 12.6.9. Sitio 9

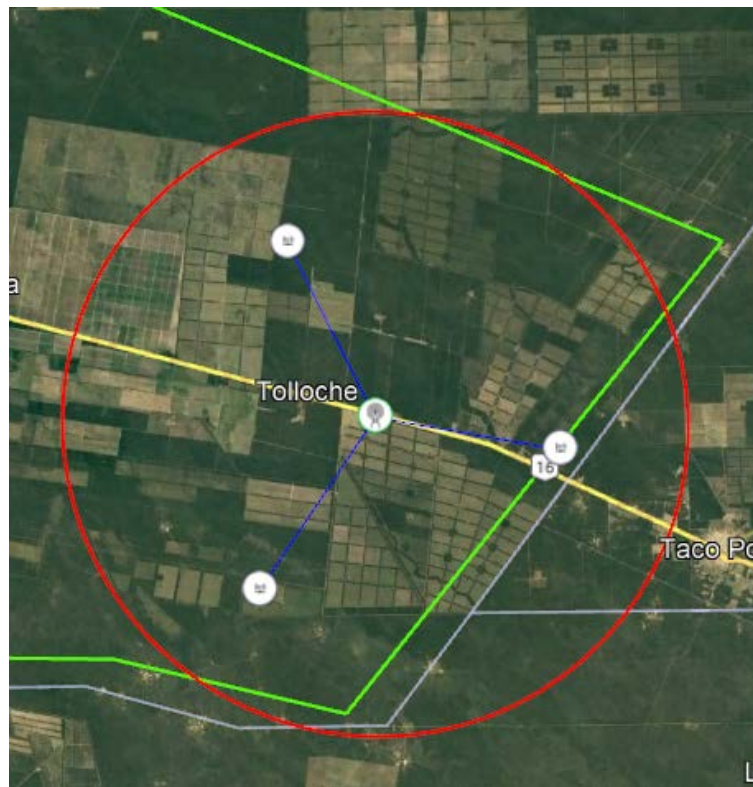
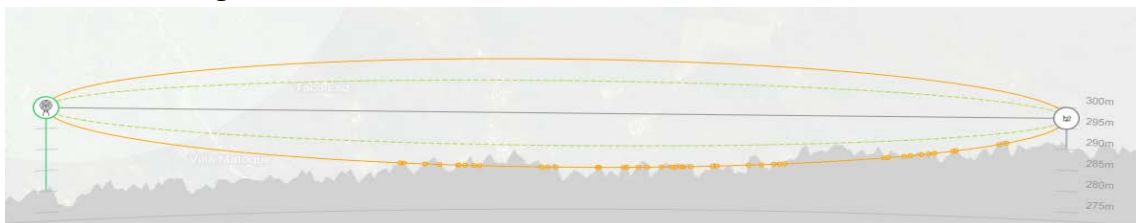


Figura 12-39. Cobertura Zona 3 - Sitio 9

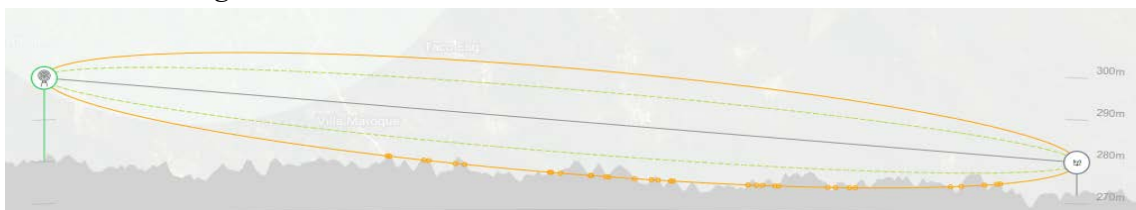
Este sitio es el último al costado de la ruta nacional 16, y está en las coordenadas -25.539597,-63.478436. Esta pensado que tenga una antena omnidireccional montada en una torre de 15, dando un radio de cobertura de 18 km.

Los perfiles de elevación que garantizan cobertura se muestran respecto a los puntos que indican la Figura 12-39.

#### Línea de vista según medición 1



#### Línea de vista según medición 2



*Línea de vista según medición 3*



**12.6.10. Sitio 10**

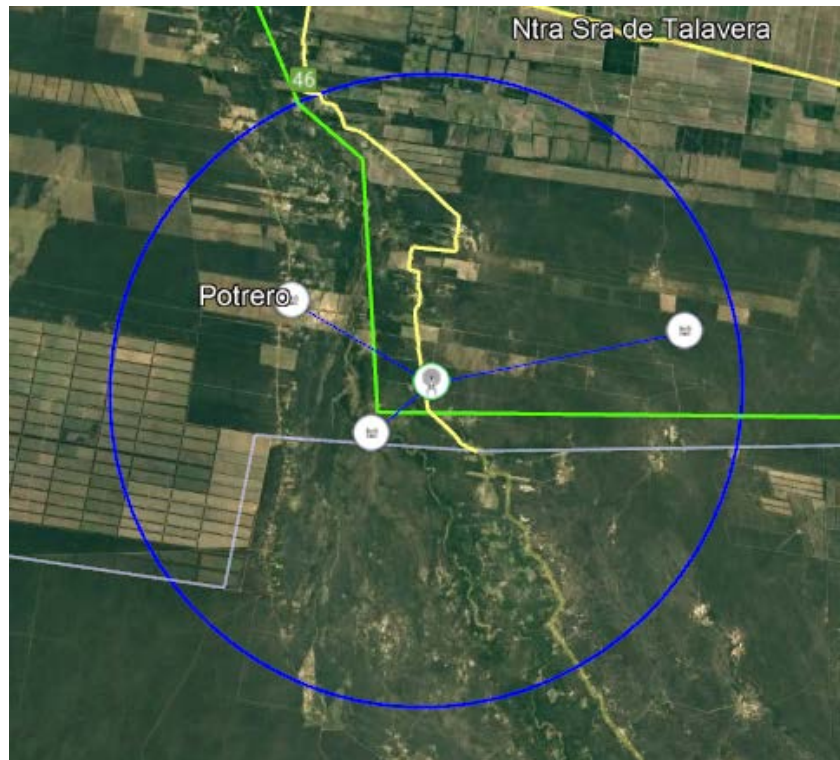


Figura 12-40. Cobertura Zona 3 - Sitio 10

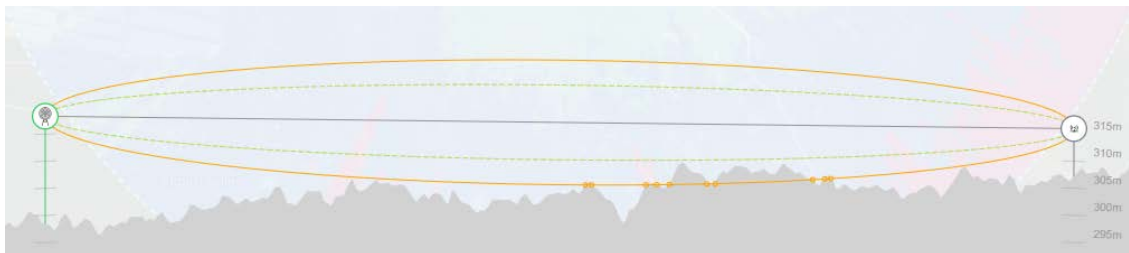
El último sitio de la zona 3 está en las coordenadas -25.647757,-63.90721 y está previsto que esté sobre una torre de 15 m de altura, para dar cobertura en un radio de 15 km.

Los puntos muestra de cobertura están marcados en la Figura 12-40.

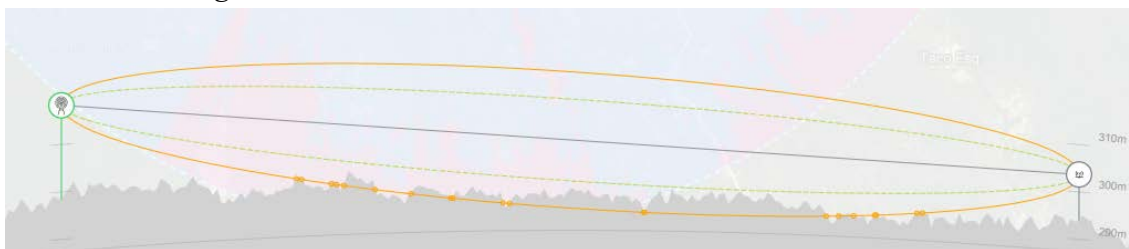
*Línea de vista según medición 1*



*Línea de vista según medición 2*



*Línea de vista según medición 3*



## 12.7. Zona 4

Esta zona se dejó para el último puesto que no hay caminos nacionales ni provinciales que cubran ese sector. Se eligieron ubicaciones para que cinco estaciones permanentes RTK puedan cubrir toda la región faltante, pero con el interrogante sobre si será factible su instalación. El mapa de cobertura de esta zona queda como lo muestra la Figura 12-41, empezando la numeración de los sitios de izquierda a derecha y de arriba abajo.

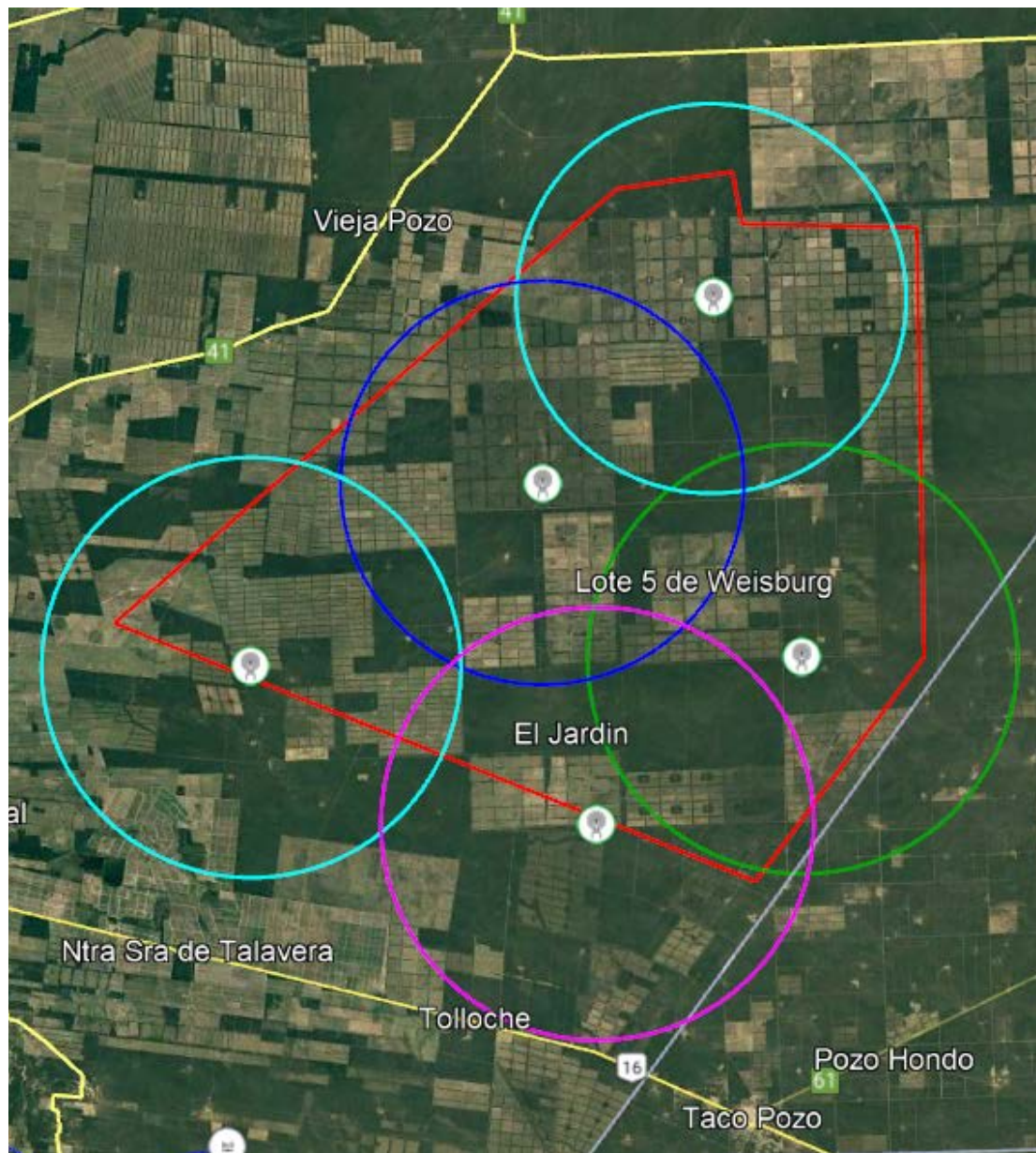


Figura 12-41. Cobertura Zona 4

### 12.7.1. Sitio 1

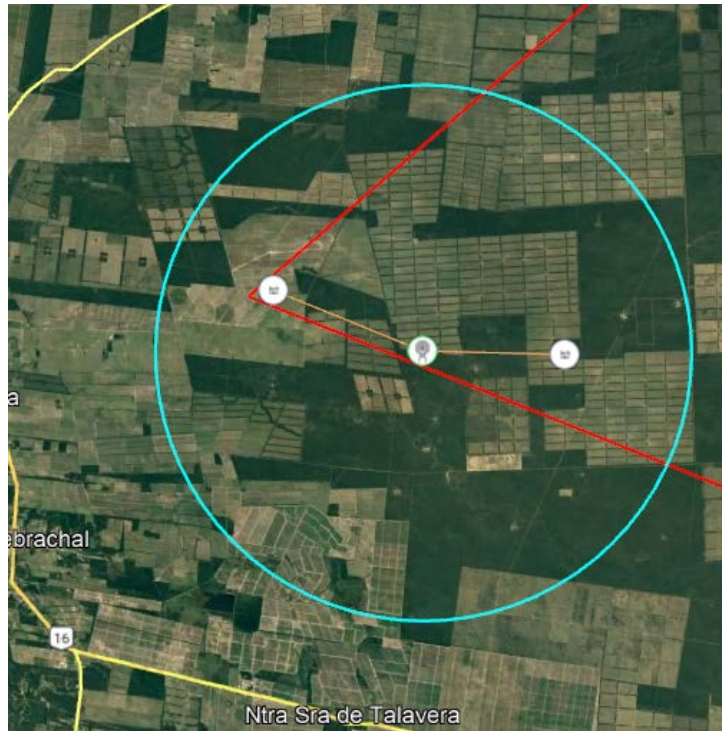


Figura 12-42. Cobertura Zona 4 - Sitio 1

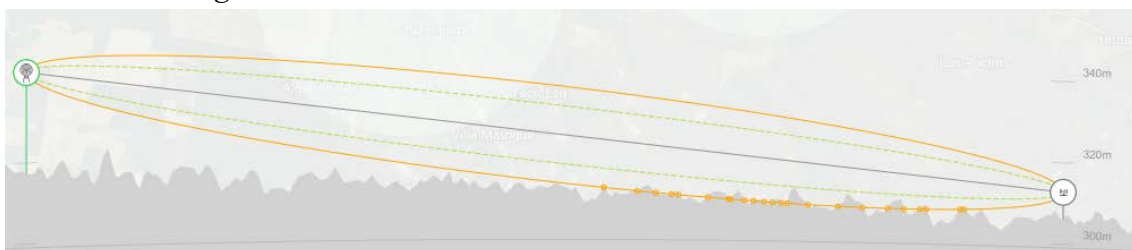
Está ubicado en las coordenadas -25.221058,-63.71521 y está previsto que cubra un radio de 20 km con una torre de 20 m de altura.

Los puntos de medición de cobertura están dados por la Figura 12-42.

#### Línea de vista según medición 1



#### Línea de vista según medición 2



### 12.7.2. Sitio 2

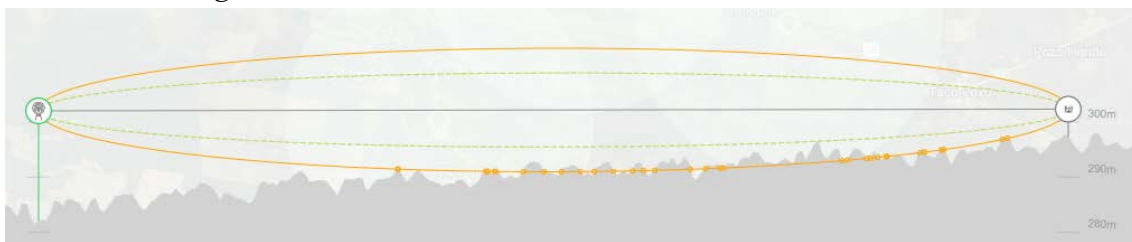


Figura 12-43. Cobertura Zona 4 - Sitio 2

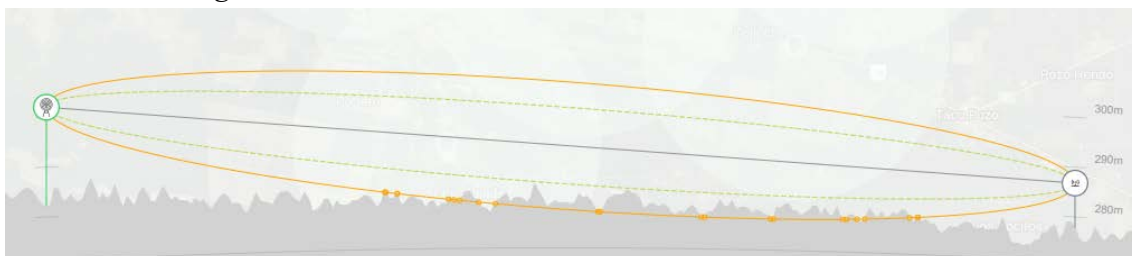
Se ubicó en las coordenadas -25.076948,-63.437312 sobre una torre de 20m. Cubre un radio de 20km.

Se aseguró la cobertura al medir el perfil de elevación en tres puntos distintos, ubicados según la Figura 12-43.

#### Línea de vista según medición 1



#### Línea de vista según medición 2



### 12.7.3. Sitio 3

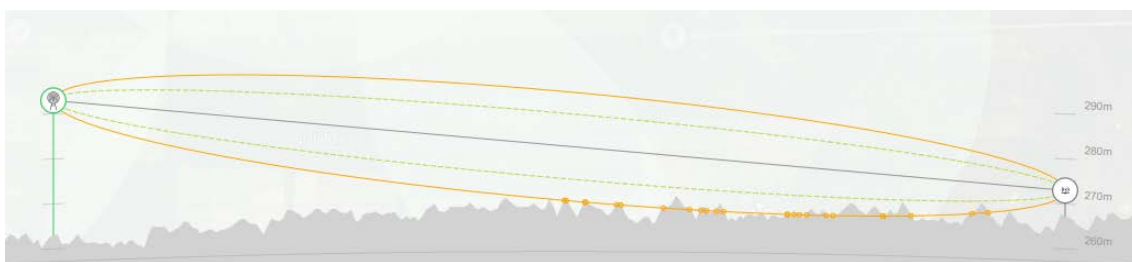


Figura 12-44. Cobertura Zona 4 - Sitio 3

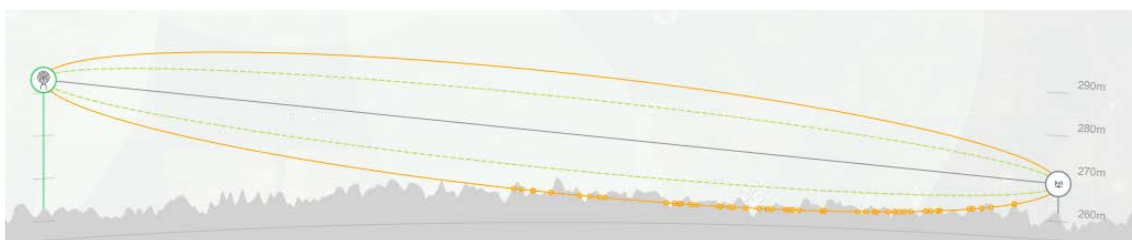
Este sitio fue ubicado en las coordenadas  $-24.925651, -63.272699$ , sobre una torre de 25m. Tiene un alcance teórico de 20km.

Los sitios testigo de línea de vista se muestran en la Figura 12-44.

#### *Línea de vista según medición 1*



#### *Línea de vista según medición 2*



#### 12.7.4. Sitio 4

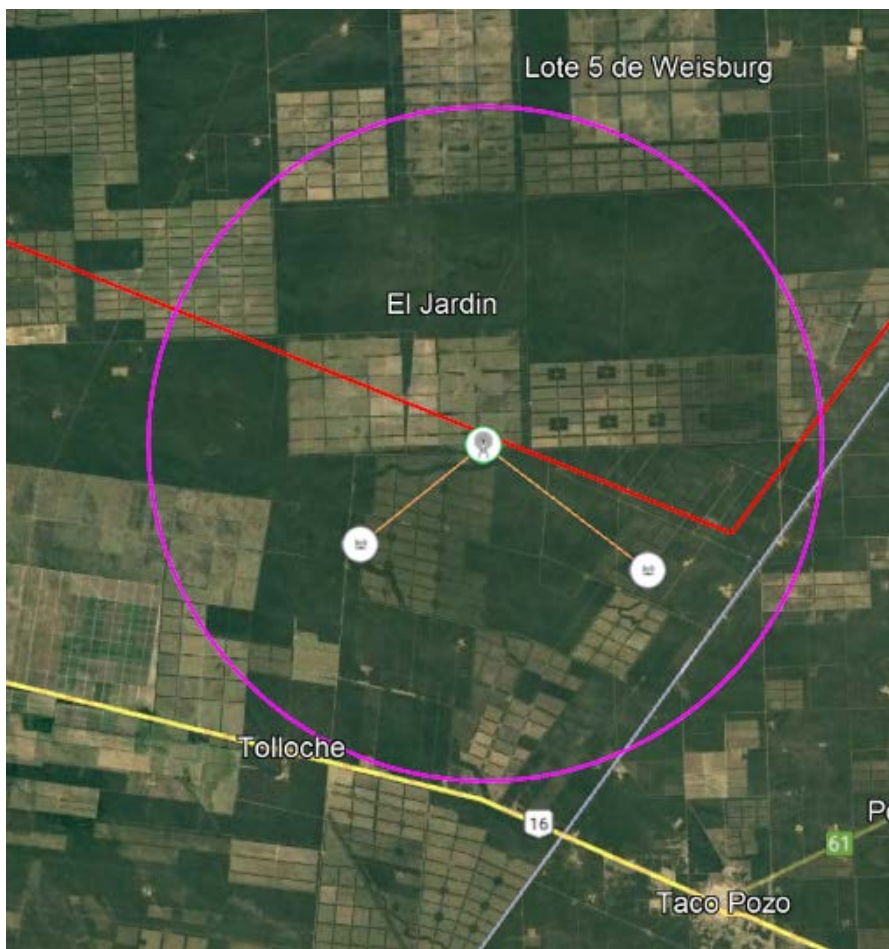
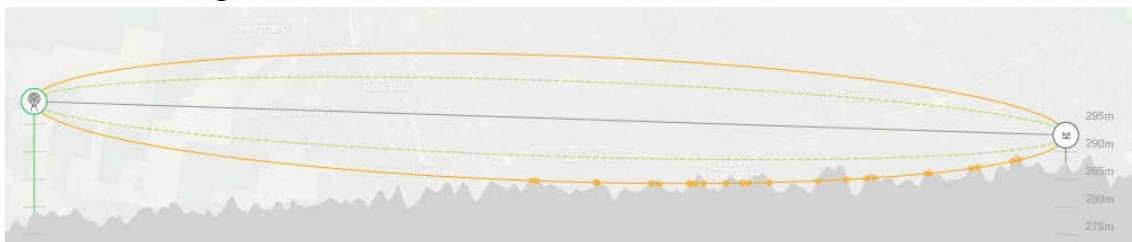


Figura 12-45. Cobertura Zona 4 - Sitio 4

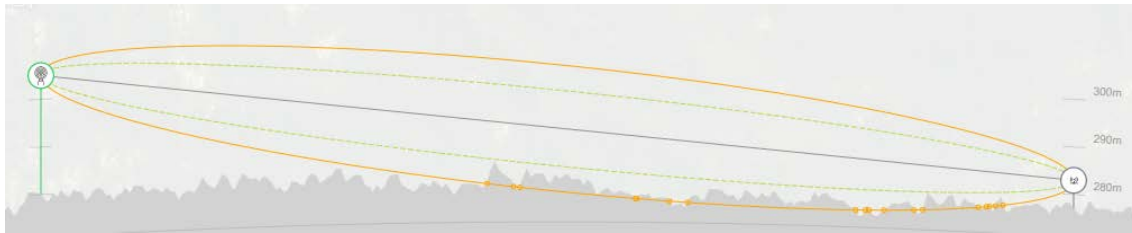
Ubicado en las coordenadas -25.364862,-63.399095, este sitio está previsto que cubra los 20km teóricos posibles. La antena omnidireccional estará montada en una torre de 20m.

Los sitios testigo de línea de vista se muestran en la Figura 12-45.

##### *Línea de vista según medición 1*



### Línea de vista según medición 2



### 12.7.5. Sitio 5

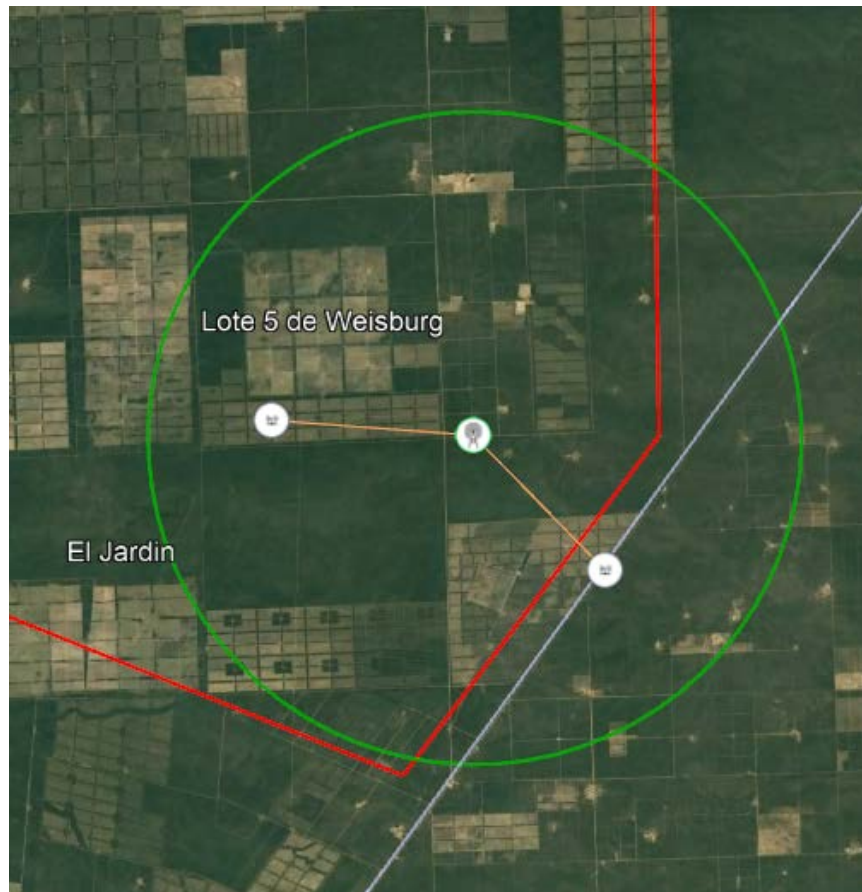
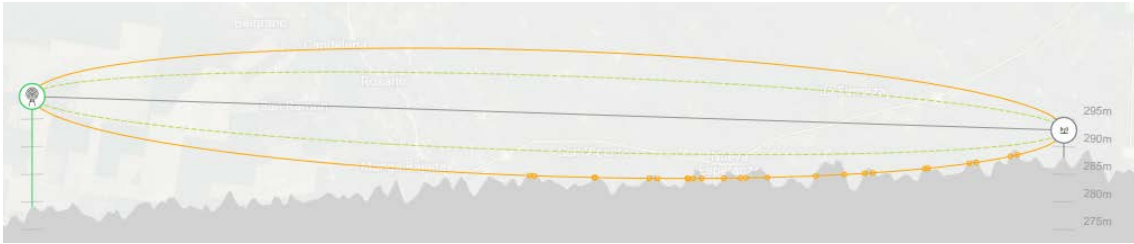


Figura 12-46. Cobertura Zona 4 - Sitio 5

Este último sitio está ubicado en las coordenadas -25.230272,-63.202746 y se prevé que cubra un radio de cobertura de 20km, con una antena omnidireccional montada sobre una torre de 25m.

Los puntos muestra de cobertura por medio de línea de vista se muestran en la Figura 12-46.

### Línea de vista según medición 1



### Línea de vista según medición 2



## 12.8. Zonas de Fresnel

El efecto Fresnel es un conjunto de fenómenos de interferencia que siempre están presentes en las transmisiones de radiofrecuencia. Para los enlaces descritos en la sección anterior, es fundamental que exista línea de vista entre el transmisor y el receptor, donde se entiende como línea de vista a la línea de visión directa sin obstáculos entre ambos puntos. Sin embargo, esto es una condición necesaria pero no suficiente para asegurar el funcionamiento de los enlaces.

Podemos considerar a las zonas de Fresnel como elipsoides entre los puntos de transmisión y recepción de la señal. Existen infinitas zonas, siendo la primera la que afecta mayormente a la intensidad de la señal. Cada una de ellas tiene un radio en el centro del elipsoide cada vez mayor.

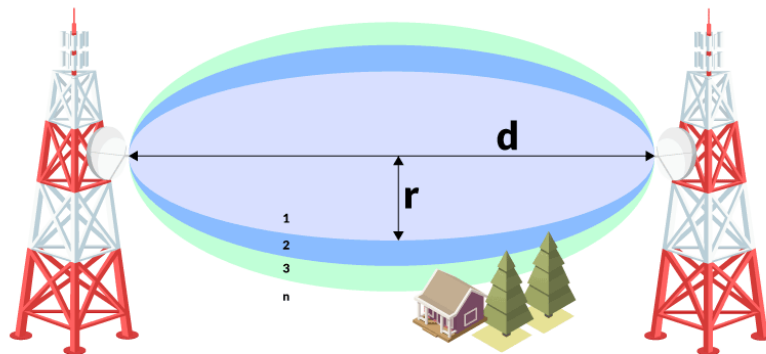


Figura 12-47. Zonas de Fresnel I

La ecuación para calcular el radio de cada zona es la siguiente:

$$F_n = \sqrt{\frac{n \cdot \lambda \cdot d_1 \cdot d_2}{d_1 + d_2}} \text{ [m]}$$

Donde

- $n$  es el número de zona de Fresnel
- $\lambda$  es la longitud de onda, en metros
- $d_1$  es la distancia del punto de cálculo a la antena emisora
- $d_2$  es la distancia del punto de cálculo a la antena receptora

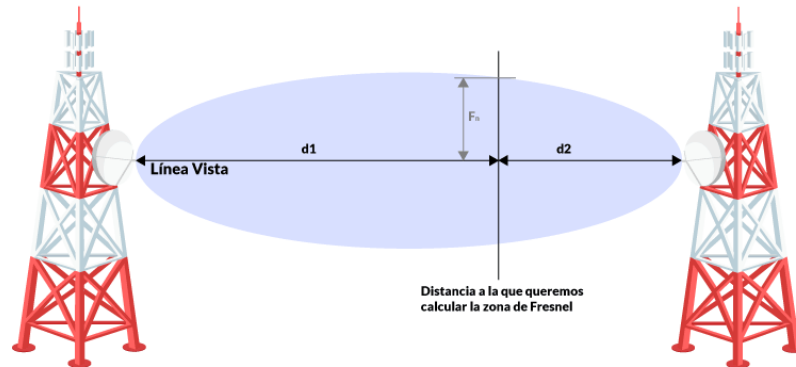


Figura 12-48. Zonas de Fresnel II

Las zonas de Fresnel son importantes para poder predecir si algún obstáculo entre las antenas va a resultar en un problema de pérdida de señal.

De acuerdo con la Recomendación UIT-R P.530-13, se considera que la primera zona de Fresnel debe estar despejada en un 60% para que se cumplan las condiciones de propagación en el espacio libre, y así poder tratar al enlace con las ecuaciones y parámetros que conocemos. De lo contrario, los cálculos que se realicen pueden no ser correctos.

Según las mediciones realizadas en los puntos más críticos de cada sitio de esta tesis, se muestra que en ningún caso existen obstáculos dentro del 60% de la primera zona de Fresnel.

A continuación, se muestra cómo se verían las mediciones si hubiera algún obstáculo.

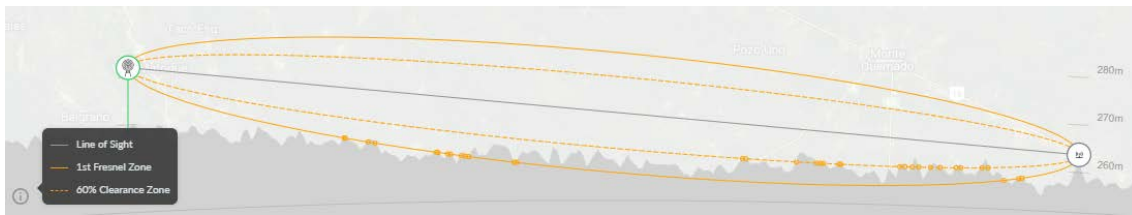
- Primera zona despejada en un 100%



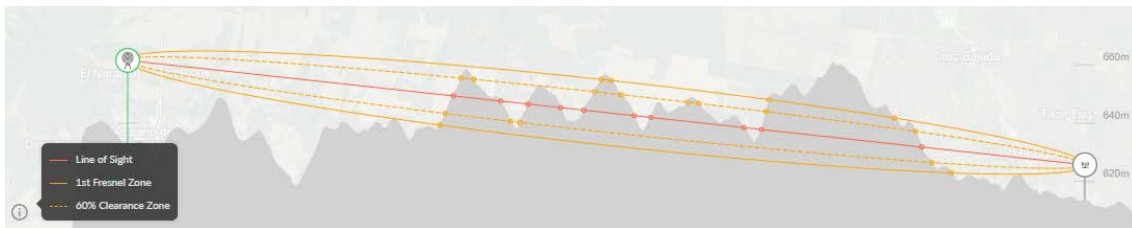
- Primera zona despejada por lo menos en un 60%



- Primera zona con obstáculos dentro del 60%



- Enlace sin línea de vista



## 12.9. Equipos RTK

Aunque la idea principal de esta tesis es dar una idea general del funcionamiento de un sistema RTK sin entrar en particularidades de marcas y sistemas propietarios, es necesario utilizar por lo menos un ejemplo concreto de receptores y antenas que pueden ser utilizados en este tipo de sistemas. Para ello se optó por mostrar y proponer el uso sistema StarFire RTK, de la empresa John Deere. A continuación, se detallarán especificaciones de radios y antenas, junto con recomendaciones e instrucciones de instalación.

### 12.9.1. Radios y antenas

El sistema StarFire RTK consta de una estación base, instalada en un campo o montada en una estructura, que transmite señales de corrección de alta precisión al receptor StarFire en un vehículo por medio de radios RTK. El receptor StarFire en el móvil debe tener una línea de vista directa a la estación base para poder recibir la señal de corrección.

El receptor con el módulo de radio RTK incorporado en el móvil se coloca encima de la máquina, el cual recibe la señal de posicionamiento global y corrección diferencial simultáneamente para luego integrar esta señal para su uso con el sistema.



*Figura 12-49. Tractor con sistema StarFire 6000 RTK instalado*

La estación base es el componente más crítico de un sistema RTK. Durante la instalación se debe tener cuidado de asegurar que la base funcione libre de problemas.



Figura 12-50. Estación base StarFire 3000 RTK

– Especificaciones técnicas

| Radio RTK de 900 MHz         |                              |
|------------------------------|------------------------------|
| Banda de frecuencias         | 915-928 MHz                  |
| Potencia de salida           | 1 Watt                       |
| Sensibilidad                 | -180 dBm a -80dBm o superior |
| Impedancia de entrada/salida | 50 Ohm                       |
| Voltaje de funcionamiento    | 9-15 Volts                   |
| Conectores de salida de RF   | TNC hembra                   |

| Antena tipo látigo de 900 MHz |                  |
|-------------------------------|------------------|
| Ganancia                      | 2 dBi            |
| Banda de frecuencias          | 915-928 MHz      |
| Impedancia                    | 50 Ohm           |
| Conector RF                   | Tipo N hembra    |
| VSWR                          | < 2:1            |
| Longitud                      | 33,5 centímetros |

### 12.9.2. Consideraciones de instalación

Si el receptor de la estación base se instala en una ubicación dudosa, el receptor podría tener dos problemas distintos: sombreado y multitrayecto.

Sombreado: Para asegurar la operación apropiada de una estación base de RTK, el receptor de GPS debe tener una vista sin obstrucción del cielo en todos los sentidos encima de 5 grados sobre el horizonte. Tanto el receptor de base como el receptor del vehículo utilizan los satélites que se encuentran a más de 5 grados por encima del horizonte. Si el receptor de la estación base no es capaz de hallar un satélite por encima de este nivel de 5 grados, entonces ninguno de los vehículos que funcionan usando esa estación base puede utilizar aquel satélite obstruido. Esto se denomina "sombreado" de la estación base. Con una cantidad excesiva de sombreado, el sistema RTK puede perder la precisión. Muchas cosas pueden causar el sombreado, tales como edificios, torres, postes y patas de tanques de granos.



*Figura 12-51. Instalación de antena cercana a torre.*



*Figura 12-52. Instalación de antena cercana a árboles*

**Multitrayecto:** Las señales reflejadas son otra fuente importante de errores en las estaciones de base que deben reducirse al mínimo. Las señales reflejadas también llegan al receptor de la estación de base y hacen que la medición de alcance del satélite sea

más larga. Los reflejos hasta pueden interferir con la señal directa al grado de que el receptor pierda temporalmente el emparejamiento con algún satélite. Los edificios metálicos, cadenas de cable y cuerpos de agua son buenos reflectores que perjudican la confiabilidad de la estación de base. Procurar colocar el receptor de la estación de base alejado de objetos reflectores para el funcionamiento confiable de la estación de base.

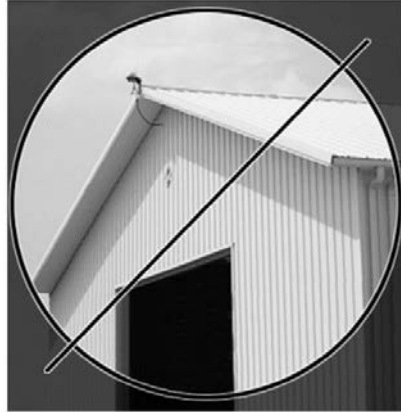


*Figura 12-53. Reflejo producido por un edificio metálico*

### **12.10. Provisionamiento eléctrico**

Cada una de estas estaciones no podría operar sin alimentar los equipos con energía eléctrica. Para solucionar este problema se propone el uso de sistemas de energía solar, ya sea como backup si es que el sitio cuenta con acceso a la red eléctrica, o bien como fuente de alimentación principal.

Se hará un único dimensionamiento que será válido para implementar en todos los sitios. El diagrama del sistema eléctrico se muestra en la Figura 12-47.

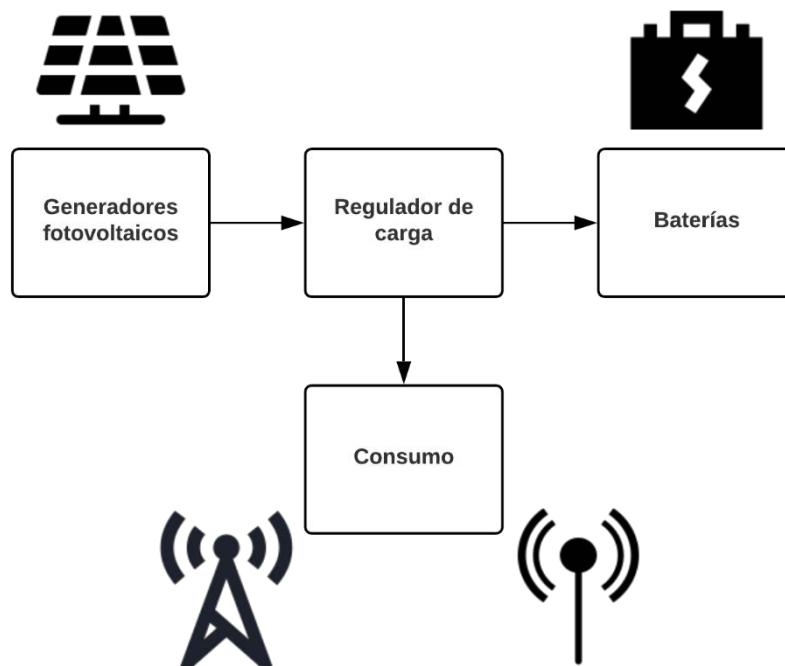


*Figura 12-54. Sistema fotovoltaico*

Pasos para dimensionar el sistema:

1. Cálculo de consumo de los equipos a alimentar y selección del tipo de panel
2. Determinación de la irradiación solar a utilizar
3. Cálculo de número de paneles necesarios
4. Cálculo de baterías
5. Cálculo del regulador

#### **12.10.1. Consumo de equipos y selección de paneles**

Se trabajará con equipos de 12v, por lo que serán necesarios paneles de ese mismo voltaje. En cada torre solo habrá un equipo de transmisión, por lo que considerando un consumo 3A habría que dimensionar el sistema para que sea capaz de otorgar 72 Ah por día.

Se eligió un panel de la marca Gi-Power, más precisamente el modelo GP-150P-36, de 150 W. Sus características son:

- Tipo de Célula: Silicio policristalino
- Número de Células: 36
- Dimensiones del Panel Solar: 1480 x 670 x 35 mm
- Potencia Máxima: 150 W
- Tensión en Circuito Abierto: 22,3 V
- Tensión en Potencia Máxima: 18,3 V
- Corriente en Cortocircuito ISC: 8,51 A
- Corriente en Potencia Máxima: 8,02 A

- Peso del Panel Solar: 10,7 Kg

Curva característica del panel a 25°

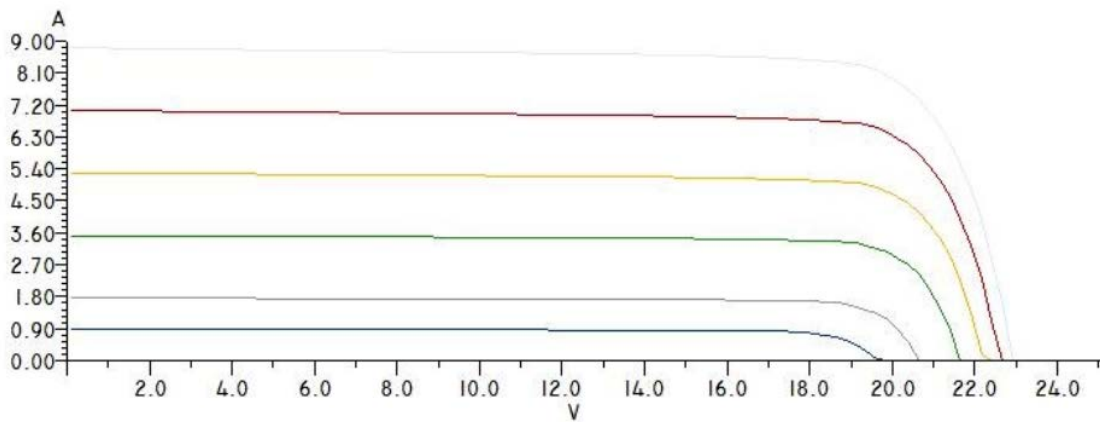


Figura 12-55. Curva característica de panel solar

- Irradiancia 100 W/m<sup>2</sup>
- Irradiancia 200 W/m<sup>2</sup>
- Irradiancia 400 W/m<sup>2</sup>
- Irradiancia 600 W/m<sup>2</sup>
- Irradiancia 800 W/m<sup>2</sup>
- Irradiancia 1000 W/m<sup>2</sup>



Figura 12-56. Panel solar Gi-Power GP-150P-36

## 12.10.2. Irradiación solar promedio

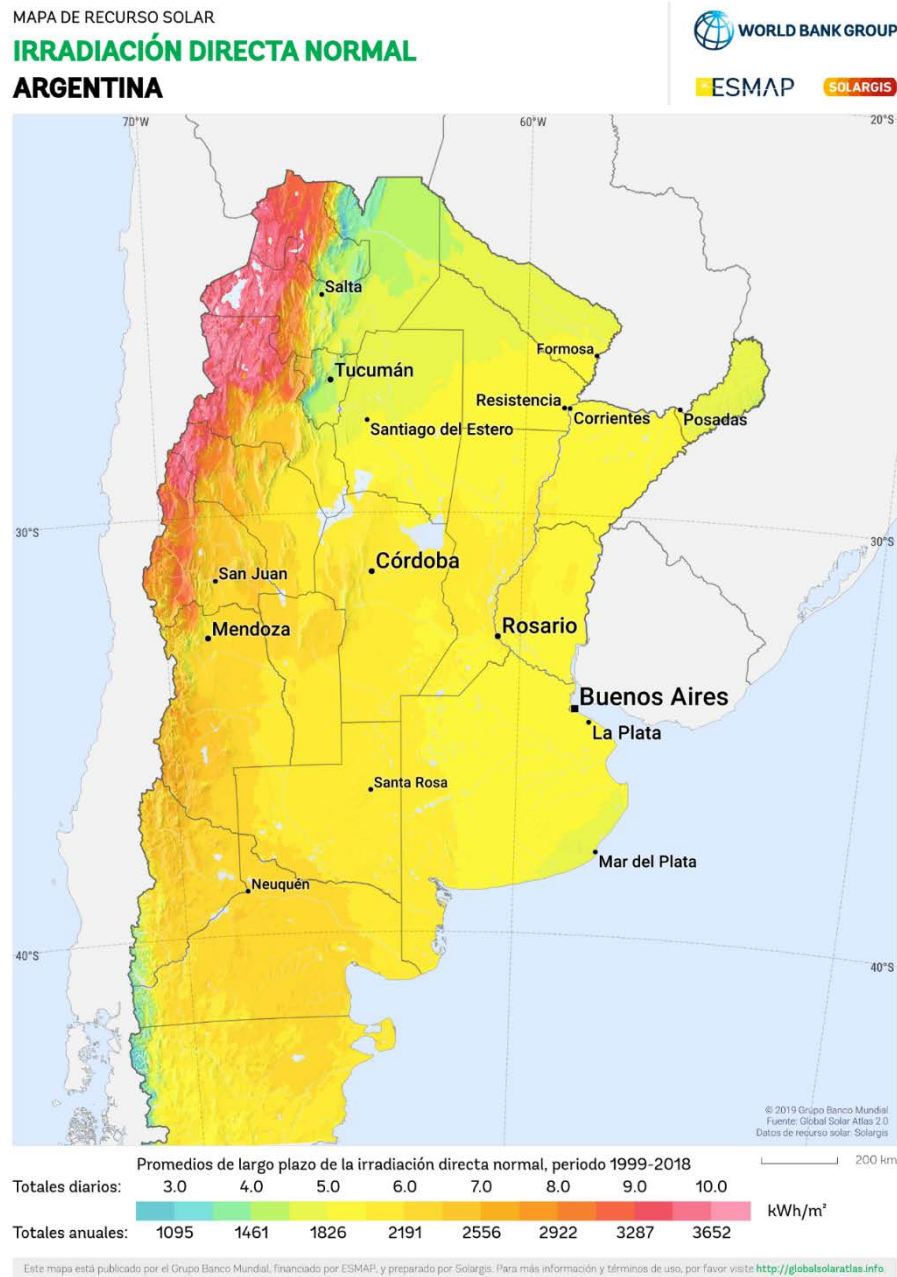


Figura 12-57. Irradiación promedio en Argentina

Usando como fuente la Figura 12-49, se estableció que la irradiación a utilizar para la zona del departamento de Anta sea de  $5 \text{ kWh/m}^2$ , lo que equivale a 5 horas solar pico por día.

## 12.10.3. Cantidad de paneles solares

Como el voltaje de trabajo de los equipos es igual al voltaje de trabajo del panel, no hace falta agregar paneles en serie para aumentar dicha característica.

Lo que hay que calcular es la cantidad de paneles necesarios en paralelo para cubrir la demanda de corriente.

$$Cantidad\ de\ paneles = \frac{Consumo * factor\ de\ seguridad}{Corriente\ máxima\ panel * Hora\ solar\ pico}$$

En nuestro caso tenemos un consumo de 72 Ah y una  $I_{max}$  del panel de 8,02 A. Se eligió un factor de seguridad de 1,2 y 5 horas solar pico.

$$Cantidad\ de\ paneles = \frac{72 * 1,2}{8,01 * 5} = \frac{86,4}{40,05} = 2,15$$

El resultado se redondea hacia el número entero más alto, por lo que se necesitarán 3 paneles solares con las características mencionadas, conectados en paralelo, para cubrir el consumo requerido.

#### 12.10.4. Cálculo de baterías

Para este apartado debe decidirse la cantidad de tiempo que se desea que el sistema de energía funcione sin que recupere carga solar. Esto puede deberse a días nublados o algún desperfecto dentro del sistema.

Se dimensionó que cada estación tenga una autonomía de 7 días una vez que sus baterías estén cargadas al 100%. También se consideró una máxima profundidad de descarga del 30%.

$$Capacidad\ batería = \frac{consumo * días\ de\ autonomía}{factor\ de\ profundidad\ de\ descarga}$$

$$Capacidad\ batería = \frac{72 * 7}{0,7} = 720\ Ah$$

#### 12.10.5. Cálculo del regulador

El regulador es el elemento que se encarga del control del estado de carga de la batería, adoptando diferentes ritmos de carga/descarga. Impide que la batería se sobrecargue o descargue profundamente, evitando daños sobre la misma.

Su capacidad está en función del amperaje proveniente de la matriz de paneles.

$$Corriente\ máxima\ del\ regulador = corriente\ máxima\ del\ panel * cantidad\ de\ paneles$$

$$Corriente\ máxima\ del\ regulador = 8,02 * 3 = 24,06\ A$$

### 12.11. Normativa vigente

Para concluir con el presente trabajo, se hará una breve reseña sobre los aspectos legales que deberían tenerse en cuenta para su correcta implementación. Esto abarcará tanto a las entidades competentes y como a las normas vigentes respecto a obras civiles y de telecomunicaciones.

Todo lo que respecta a obras civiles es 100% dependiente del municipio en el que se realizarán dichas obras, que, en este caso, son el montaje de antenas y estructuras soporte, comúnmente denominadas torres. Al mismo tiempo, la ANAC (Asociación Nacional de Aviación Civil) es la encargada de las normativas de señalamiento e iluminación de las mismas. Por último, el encargado de toda normativa de telecomunicaciones es el ENACOM (Ente Nacional de Comunicaciones).

#### **12.11.1. Municipios**

El departamento de Anta cuenta con 5 municipios, que son:

- Apolinario Saravia
- El Quebrachal
- General Pizarro
- Joaquín Víctor González
- Las Lajitas

Cada uno de ellos será el encargado de la aprobación de los planos civiles para la construcción de cada estructura soporte de antena.

#### **12.11.2. ANAC**

La Asociación Nacional de Aviación Civil es la responsable de la normativa respecto al señalamiento e iluminación de estructura soporte de antenas, entre otras funciones. Al no haber aeródromos en todo el departamento de Anta, no se consideran las normativas respecto al emplazamiento de objetos en zona de influencia de aeródromos.

Las normas de señalamiento diurno e iluminación de objetos provista por la ANAC en su anexo II detallan lo siguiente:

- Señalamiento diurno: Se pintará la estructura en franjas alternadas con los colores naranja internacional y blanco, o rojo y blanco, pintando la primera y la última de las mismas con el color más fuerte, según lo detallado en la Figura 12-50.  
Para el caso particular de torres de comunicaciones, el señalamiento se implementará por tramos que no superen los 6 metros cada uno.



*Figura 12-58. Señalamiento diurno de torres de comunicaciones*

- Uso de balizas: Las balizas utilizadas se situarán siempre en posiciones bien visibles, de modo que definan la forma general del objeto y serán identificables en tiempo despejado desde una distancia de 1000 metros por lo menos, en caso de objetos que se vean desde el aire y desde una distancia de 300 metros tratándose de objetos que se vean desde tierra. La forma de las balizas será tan característica como sea necesario, a fin de evitar que se confundan con otras empleadas para indicar otro tipo de información y no deberán aumentar el peligro que presenten los objetos que señalen. Además, éstas deberían ser de un solo color; cuando se utilicen de color blanco y rojo o blanco y anaranjado, las balizas deberían alternarse. El color seleccionado debería contrastar con el fondo contra el cual hayan de verse.

### 12.11.3. ENACOM

El Ente Nacional de Comunicaciones es un ente autárquico y descentralizado que funciona en el ámbito de la Jefatura de Gabinete de Ministros de la Nación. Su objetivo es conducir el proceso de convergencia tecnológica y crear condiciones estables de mercado para garantizar el acceso de todos los argentinos a los servicios de internet, telefonía fija y móvil, radio, postales y televisión.

En lo que al proyecto respecta, el ENACOM cumple funciones trascendentales para que pueda ser implementado en el futuro, ya que determina las condiciones de operación para la banda de 915-928 MHz. Por otro lado, dispone conforme al artículo 1 de la Resolución 530/2000 que el Estándar Nacional de Seguridad para la exposición a radiofrecuencias comprendidas entre 100 KHz y 300 GHz, conforme lo establecido en el “Manual de estándares de seguridad para la exposición a radiofrecuencias comprendidas entre 100 KHz y 300 GHz. ”y“ Radiación de radiofrecuencias: consideraciones biofísicas, biomédicas y criterios para el establecimiento de estándares de exposición”, volúmenes I y II respectivamente de la “Prospección de radiación electromagnética ambiental no ionizante”, aprobado por el artículo 1º de la Resolución N°202/95 del Ministerio de Salud y Acción Social de la Nación, será de aplicación obligatoria a todos los sistemas de Telecomunicaciones que irradian, en frecuencias comprendidas entre 100 KHz y 300 GHz, situados en el territorio nacional.

#### 12.11.3.1. Resolución 4653 ENACOM/19

Según la Resolución 4653 ENACOM/19, se dispone que la banda de 915-928 MHz en modalidad compartida y sin requerir autorización en conformidad con la Resolución N°581 MM/2018, deberá respetar las siguientes condiciones y parámetros técnicos:

- Potencia máxima: para sistemas de modulación digital de banda ancha, como es el caso del proyecto, la potencia media conducida máxima no deberá superar 1 W, mientras que la P.I.R.E. no deberá superar de 4 W.
- Ancho de banda: La anchura de banda del espectro de emisión medida con resolución espectral de 100 kHz entre puntos extremos correspondientes a una caída de 6 dB, respecto al punto de mayor nivel, será por lo menos de 500 kHz.
- Densidad espectral de potencia: La densidad espectral de potencia máxima conducida no deberá superar 8 dBm en un ancho de banda medición de 3kHz.
- Emisiones no deseadas: La potencia de las emisiones no deseadas en cualquier banda fuera de la banda de operación del transmisor deberá estar atenuada por lo menos 30 dB respecto a la emisión de mayor nivel dentro de la banda de operación, ambas medidas con un ancho de banda de resolución de 100 kHz.

#### 12.11.3.2. Autorización en otras bandas de frecuencia

Se trabajó en la banda de frecuencia mencionada con anterioridad debido a que no es necesario pedir autorización para utilizarla, pero en el caso que sea necesario utilizar la banda de 450 MHz o cualquier otra que no esté incluida en la Resolución

4653 ENACOM/19 se deberá solicitar una autorización que permita el uso en la banda que se requiera.

### ***12.11.3.3. Sistema de Ventanilla Única***

En el año 2018, por medio del Decreto 997/18, se estableció un Sistema de Ventanilla Única para la instalación de estructuras soporte de antenas, con la finalidad de agilizar el otorgamiento de sus correspondientes autorizaciones, permisos o habilitaciones de ubicación, construcción e instalación, mediante la coordinación entre autoridades nacionales, provinciales y de la CABA, y municipales.

Según esto, los licenciarios del Servicio de Comunicaciones Móviles (SCM) y los Operadores Independientes de Infraestructura Pasiva, presentarán las solicitudes correspondientes ante la oficina del Sistema, que requerirá los informes técnicos a las dependencias competentes del ENACOM, con relación al cumplimiento de los requisitos técnicos establecidos en la normativa de telecomunicaciones vigente y los estándares de calidad y presupuestos mínimos de protección ambiental, conforme las recomendaciones de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU) y la Organización Mundial de la Salud (OMS).

El ENACOM deberá expedirse en forma expresa respecto de los niveles de emisiones radioeléctricas no ionizantes y las condiciones técnicas y de servicio de la solicitud. Si la resolución fuera favorable, remitirá lo actuado a la autoridad local competente, a fin de que tome la intervención que le corresponde en relación con el cumplimiento de las normas urbanísticas y de seguridad de las instalaciones. En caso de que la solicitud de autorización, permiso o habilitación de la estructura soporte de antena no cumpliera con las normas urbanísticas y de seguridad, la autoridad local deberá proponer localizaciones alternativas razonables que no entorpezcan la normal prestación del servicio de comunicaciones móviles. La autoridad local comunicará su decisión al ENACOM para la continuidad del trámite. A su vez, el ENACOM comunicará a los municipios o autoridades locales en cuyas jurisdicciones la falta de otorgamiento de las autorizaciones, permisos o habilitaciones impida o demore el despliegue de las redes, el grado de afectación en términos de calidad, conectividad y acceso a servicios móviles.

Cabe destacar que este sistema debe ser promulgado mediante una ordenanza en cada municipio que quiera implementarlo.

## 13. Conclusiones

Con el trabajo desarrollado se buscó no solo establecer las bases para la implementación de una red GPS-RTK, sino que también se quiso explicar detalladamente los conceptos base para la creación de estos sistemas. De esta manera, se logró dar un paso importante en la brecha entre lo que es la teoría y la práctica.

La cobertura en el departamento de Anta, en la provincia de Salta, quedó conformada según la Figura 13-1.

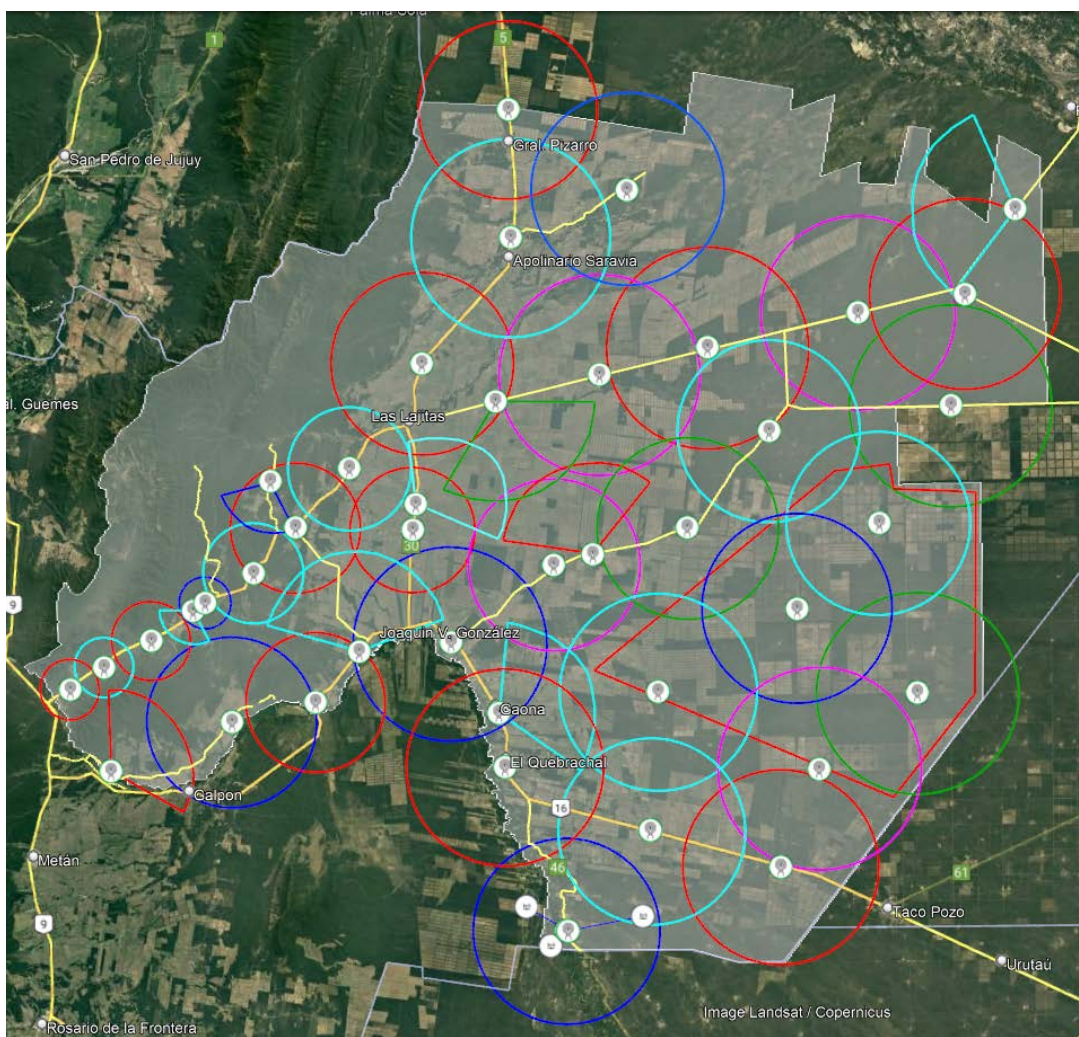


*Figura 13-1. Cobertura de red RTK*

Al mismo tiempo, el trabajo se organizó de manera tal que fue posible dimensionar sistemas fotovoltaicos para la alimentación eléctrica de las estaciones permanentes RTK.

Todo esto permite un crecimiento importante en el área de agricultura para la provincia de Salta, pudiendo automatizar procesos y llevar un mejor control de variables importantes de toda índole en el área.

## 14. Bibliografía

- [1] **International Earth Rotation and Reference Systems Service (2021).** Obtenido de <https://www.iers.org/IERS/EN/DataProducts/data.html>
- [2] **BERNÉ VALERI, J.L. [et al] (2014).** GNSS: GPS: fundamentos y aplicaciones en Geomática. Valencia: Universitat Politècnica de València.
- [3] **Official U.S. government information about the GPS and related topics (2020).** Obtenido de <https://www.gps.gov/systems/gps/>
- [4] **Bernard Cohen (1980).** The Newtonian Revolution. Cambridge University Press.
- [5] **Andrea Liliana Bel [et al.] (2019).** La matemática detrás del GPS.
- [6] **Huerta, E. – Mangatierra, A. – Noguera, G. (2005).** GPS: posicionamiento satelital 1a. ed. - Rosario: UNR Editora - Universidad Nacional de Rosario.
- [7] **Seeber, Günter (1941).** Satellite geodesy: foundations, methods, and applications.
- [8] **SUSANA FERRARIO DE URRIZA (2000).** El ABC del GPS.
- [9] **Capas SIG (2021).** Obtenido de <https://www.ign.gob.ar/NuestrasActividades/InformacionGeoespacial/CapasSIG>
- [10] **Normativa ENACOM (2021).** Obtenido de <https://www.enacom.gob.ar/normativas/grupos>
- [11] **Manual Link Planner (2021).** Obtenido de [http://linkplanner.cambiumnetworks.com/doc/about\\_this\\_user\\_guide.html](http://linkplanner.cambiumnetworks.com/doc/about_this_user_guide.html)
- [12] **Productos John Deere (2021).** Obtenido de <https://www.deere.com.ar/es/agricultura-de-precisi%C3%B3n/receptores-y-monitores/base-rtk/>
- [13] **Revista Tecnología en Agricultura de Precisión John Deere (2021).** Obtenido de <https://www.deere.com.ar/es/magazines/publication.html?id=6bfad96d#2>
- [14] **Manual Radio StarFire RTK de 900 MHz John Deere (2021).** Obtenido de <https://manualzz.com/doc/5564287/radio-starfire-rtk-de-900-mhz---stellarsupport-global>