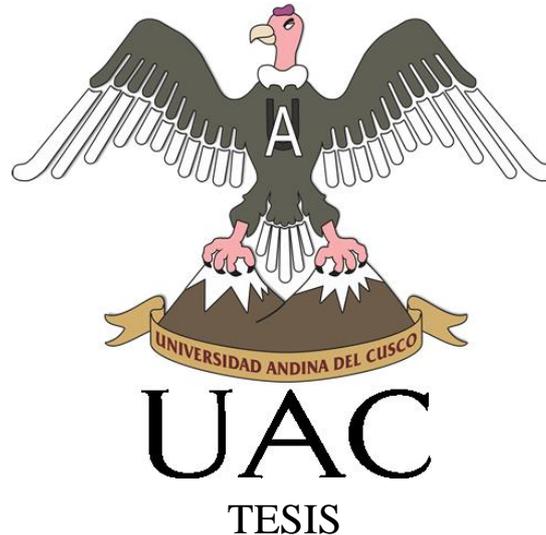




UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



**"ESTUDIO DE IMPACTO VIAL DEL AEROPUERTO
INTERNACIONAL DE CHINCHERO EN LA CARRETERA
CHINCHERO - URUBAMBA DE ACUERDO CON LA METODOLOGÍA
HCM 2010 "**

Presentado por los Bachilleres:

Vicente Vargas, Eric Xavier

Vicente Vargas, Victor Franz

Para optar al Título Profesional de
Ingeniero Civil

Asesor:

Ing. Robert Milton Merino Yepes

CUSCO – PERÚ

2019



Dedicatoria

La presente tesis de investigación está dedicada a mis padres Liliam y Hugo por ser pilares en mi vida y mi soporte incondicional, por su apoyo y confianza brindados en todo momento y por ser mis guías durante mi vida.

También está dedicada a mis abuelos Alfredo y Justina que son mi ejemplo de vida, de fuerza, trabajo duro y perseverancia,

A mi hermana Tatiana por darme alegría en la vida.

A Patty por ser mi inspiración y mi apoyo incondicional para seguir mis metas y mis sueños.

Y a todos mis amigos que siempre están presentes en mi vida.

-Franz

Dedico el resultado de esta investigación a mis padres Liliam y Hugo y mi hermana Tatiana por estar siempre presentes en mi vida alentando y apoyando mis metas, por su apoyo incondicional y su amor siempre brindado.

Está dedicada a mis abuelos Alfredo y Justina por sus enseñanzas que me permiten mejorar como persona.

Y finalmente a todos mis amigos y familiares que apoyaron en la finalización de esta ardua tarea académica.

-Eric



Agradecimientos

Agradecemos a la Universidad Andina del Cusco por ser los formadores de nuestra profesión, por brindarnos educación de calidad y prepararnos para el mundo laboral.

A nuestro asesor Ing. Robert Milton Merino Yépez por dedicar su tiempo en direccionar nuestro proyecto de tesis, por brindarnos sus conocimientos y su apoyo constante, necesarios para culminar la presente tesis.

Agradecemos a todos los docentes de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura que brindaron su tiempo, conocimientos y paciencia para formarnos para la vida profesional.

Y finalmente el más sincero agradecimiento para nuestras familias y amigos que brindaron apoyo, colaboración e inspiración para poder culminar satisfactoriamente este paso importante de la vida profesional.

-Eric y Franz



Resumen

El gran crecimiento de turistas en la ciudad de Cusco derivó en la necesidad de construir una infraestructura aeroportuaria que pueda atender de una manera óptima la demanda de vuelos por parte de los usuarios nacionales e internacionales, este nuevo desarrollo se denomina Aeropuerto Internacional de Chinchero el cual será un nuevo polo generador de viajes y tendrá un impacto en la carretera Chinchero-Urubamba.

Para determinar el impacto vial se realizó el análisis del nivel de servicio de la carretera mediante el manual norteamericano denominado *Highway Capacity Manual 2010*.

Se obtuvo como resultados que la carretera Chinchero – Urubamba presenta en promedio un nivel de servicio “D” hacia Urubamba y “E” hacia Cusco, estos niveles de servicio se verán afectados en los tramos críticos con una reducción del 8% en la velocidad promedio de marcha y un incremento del 41% del tiempo perdido en colas, con niveles de servicio de “D” hacia Urubamba y “E” hacia Cusco con el inicio de operaciones del Aeropuerto Internacional de Chinchero.

Para mejorar estos niveles se propuso la aplicación de carriles de adelantamiento con lo cual se obtuvo en promedio niveles de servicio “D” hacia Urubamba y “E” hacia Cusco, siendo esta infraestructura regresando los niveles de servicio a su situación original.

La mejor solución se obtuvo al reemplazar la actual carretera de dos carriles a una carretera multicarril de cuatro carriles, con lo cual se obtuvo un nivel de servicio “A” con el Aeropuerto Internacional de Chinchero y un nivel de servicio “B” en el año horizonte 2030.



Abstract

The growth of tourists in the city of Cusco is derived from the need to build an airport infrastructure that cannot be met in a better way to the demand of national and international users, this new development is called Aeropuerto Internacional de Chinchero, which will be a new pole that generates travel and will have an impact on the Chinchero-Urubamba highway.

To determine the road impact, an analysis of the service level of the road was made using the North American manual called Highway Capacity Manual 2010.

It was obtained as results that the Chinchero - Urubamba road presents on average in a service level "D" towards Urubamba and in "E" towards Cusco, these service levels will be within the limits of a reduction of 8% in the average travel speed and a 41% increase in the percent of time lost following, resulting in the service levels of "D" to Urubamba and "E" to Cusco with the start of operations of Chinchero International Airport.

In order to improve these levels, the application of advance lanes was proposed, which resulted in average "D" service levels towards Urubamba and "E" towards Cusco, this infrastructure returning the service levels to their original situation.

The best solution was obtained by replacing the current two-lane highway with a four-lane multi-lane highway, with which an "A" service level was obtained with the Chinchero International Airport and a "B" service level in the year horizon 2030.



Introducción

El presente trabajo de investigación fue desarrollado con el objetivo de determinar el impacto vial del nuevo Aeropuerto Internacional de Chinchero, el cual, al ser un nuevo polo generador de viajes, atraerá una cantidad adicional de vehículos a la carretera de Chinchero-Urubamba, siendo necesario evaluar como modificará la calidad de operación de esta carretera y su posible medida de mitigación.

Para poder mitigar los impactos negativos será necesario hacer modificaciones a la infraestructura vial existente, siendo el alcance principal de la investigación la obtención de una sección transversal que atenderá de manera óptima la demanda vehicular futura.

Para medir el impacto vial se utilizó el concepto de nivel de servicio el cual describe las condiciones de operación de los flujos vehiculares y su percepción de los usuarios, conceptos que tienen su lineamiento en el manual norteamericano *Highway Capacity Manual 2010* así como se aplicó la metodología descrita en este texto, los principales conceptos son la metodología de una carretera de dos carriles y de carreteras multicarril.



Índice general

Dedicatoria	ii
Agradecimientos	iii
Resumen	iv
Abstract	v
Introducción.....	vi
Índice general.....	vii
Índice de tablas.....	x
Índice de figuras.....	xix
CAPÍTULO 1. Planteamiento del problema	22
1.1. Identificación del problema.....	22
1.1.1. Ubicación temporal y geográfica del estudio	22
1.1.2. Descripción del problema	23
1.1.3. Formulación interrogativa del problema	30
1.2. Justificación e Importancia de la investigación	31
1.2.1. Justificación técnica	31
1.2.2. Justificación social.....	31
1.2.3. Justificación por viabilidad.....	31
1.2.4. Justificación por relevancia.....	31
1.3. Limitaciones de la Investigación	31
1.3.1. Limitaciones geográficas.....	31
1.3.2. Limitaciones metodológicas.....	31
1.3.3. Limitaciones de datos	32
1.4. Objetivos de la investigación.....	32
1.4.1. Objetivo general.....	32
1.4.2. Objetivos específicos	32
CAPÍTULO 2. Marco teórico.....	33
2.1. Antecedentes de la tesis.....	33
2.1.1. Antecedentes a nivel nacional	33
2.1.2. Antecedentes a nivel internacional	34
2.2. Aspectos Teóricos Pertinentes	35
2.2.1. Estudio de impacto vial.....	35



2.2.2. Sistema de transporte..... 36

2.2.3. Sistema vial 37

2.2.4. Corrientes de tránsito 52

2.2.5. Capacidad y nivel de servicio 59

2.2.6. Transito futuro 65

2.2.7. Tráfico generado por el Aeropuerto Internacional Chinchero..... 68

2.2.8. Metodología del HCM 2010 para Carreteras de dos carriles 76

2.2.9. Metodología con carriles de adelantamiento 100

2.2.10. Metodología para carretera multicarril según HCM 2010 106

2.3. Hipótesis 122

2.3.1. Hipótesis general 122

2.3.2. Sub hipótesis 122

2.4. Variables e indicadores 123

2.4.1. Variables independientes 123

2.4.2. Variables dependientes 123

2.4.3. Cuadro de operacionalización de variables 125

CAPÍTULO 3. Metodología 126

3.1. Metodología de la investigación..... 126

3.1.1. Enfoque de la investigación 126

3.1.2. Nivel o alcance de la investigación 126

3.1.3. Método de la investigación..... 127

3.2. Diseño de Investigación..... 127

3.2.1. Diseño metodológico 127

3.2.2. Diseño de ingeniería 127

3.3. Población y muestra 129

3.3.1. Población 129

3.3.2. Muestra..... 129

3.3.3. Criterios de inclusión 130

3.4. Instrumentos..... 130

3.4.1. Instrumentos metodologías o instrumentos de recolección de datos 130

3.4.2. Formato de Datos geométricos 132

3.4.3. Formato de velocidad 133

3.4.4. Instrumentos de Ingeniería..... 134

3.5. Procedimiento de recolección de datos:..... 135

3.5.1. Recopilación de datos geométricos..... 135

3.5.2. Aforo vehicular..... 160

3.5.3. Estudio de Velocidad..... 218



3.6. Procedimiento de análisis de datos 225

3.6.1. Análisis de tránsito vehicular 225

3.6.2. Composición vehicular 236

3.6.3. Velocidad a flujo libre (FFS)..... 244

3.6.4. Análisis de tránsito proyectado 255

3.6.5. Nivel de servicio en carretera de dos carriles, Situación Actual 269

3.6.6. Nivel de servicio en carretera de dos carriles, con la puesta en marcha del Aeropuerto Internacional de Chinchero, año 2021 291

3.6.7. Nivel de servicio de la carretera con carriles de adelantamiento durante el inicio de operación del aeropuerto Internacional Chinchero 313

3.6.8. Nivel de servicio en una carretera multicarril durante el inicio de operaciones del Aeropuerto Internacional Chinchero..... 325

3.6.9. Nivel de servicio con una carretera multicarril en un horizonte de 11 años con la operación del Aeropuerto Internacional Chinchero. 337

CAPÍTULO 4. Resultado 349

4.1. Tramo I:..... 349

4.2. Tramo II:..... 350

4.3. Tramo III:..... 351

4.4. Tramo IV: 352

4.5. Tramo V: 353

4.6. Tramo VI: 354

4.7. Tramo VII: 355

4.8. Tramo VIII: 356

4.9. Tramo IX:..... 357

4.10. Tramo X:..... 358

Discusión..... 359

Glosario..... 362

Conclusiones 365

Recomendaciones 367

Referencias 368

Anexos 371



Índice de tablas

Tabla 1: Mínima distancia de visibilidad de adelantamiento para carreteras de dos carriles	57
Tabla 2: Capacidad en carreteras multicarril.....	58
Tabla 3: Medidas de eficacia para la definición de nivel de servicio	62
Tabla 4: Tasa de crecimiento promedio anual de la población censada según departamento	65
Tabla 5: Crecimiento del Producto bruto interno por años	66
Tabla 6: Demanda horaria de tráfico generado por el AICC en 2021	70
Tabla 7: Demanda horaria de tráfico generado por el AICC en 2030	71
Tabla 8: Demanda horaria de tráfico generado por el AICC en 2060	72
Tabla 9: Distribución del tráfico aéreo del AICC por destino.....	73
Tabla 10: Distribución horaria del tráfico en el eje viario Cusco-Urubamba en el horizonte 2021	73
Tabla 11: Distribución horaria del tráfico en el eje viario Cusco-Urubamba en el horizonte 2030	74
Tabla 12: Distribución horaria del tráfico en el eje viario Cusco-Urubamba en el horizonte 2060	74
Tabla 13: Datos de entrada necesarios por el HCM 2010 en carreteras de dos carriles	78
Tabla 14: Factor de ajuste para ancho de carril y de berma (fls).....	80
Tabla 15: Factor de ajuste por densidad de accesos (FA)	81
Tabla 16: Factor de ajuste por la pendiente (ATS) en terreno general o descensos específicos	83
Tabla 17: Factor de ajuste por la pendiente para (ATS) en ascensos específicos	84
Tabla 18: Factor de equivalencia de vehículos pesados y recreacionales en terreno general y descensos específicos para ATS	86
Tabla 19: Factor de equivalencia de vehículos recreacionales (E_r) en ascensos específicos para ATS.	86
Tabla 20: Factor de equivalencia de vehículos pesados (E_t) en ascensos específicos para ATS.....	87
Tabla 21: Factor de equivalencia para camiones en descenso que operan a velocidad lenta E_{TC}	89
Tabla 22: Factores de ajuste por zonas de no rebase para ATS ($F_{np,ATS}$)	90
Tabla 23: Factor de ajuste por la pendiente en terreno general y descensos específicos para PTSF	92
Tabla 24: Factor de ajuste por la pendiente en ascensos específicos para PTSF.....	92
Tabla 25: Factor de equivalencia de vehículos pesados (E_t) y recreacionales (E_r) para (PTSF) en terreno general y descensos específicos.....	93
Tabla 26: Factor de equivalencia de vehículos pesados (E_t) y recreacionales (E_r) para (PTSF) en ascensos específicos.....	94
Tabla 27: Coeficientes para determinar la base de PTSF.....	96
Tabla 28: Factor de Ajuste por zona de no adelantamiento para PTSF	96
Tabla 29: Nivel de servicio en carreteras de dos carriles	97
Tabla 30: Longitud afectada por carriles de adelantamiento.....	99
Tabla 31: Longitudes optimas de los carriles de adelantamiento	101
Tabla 32: Factor de ajuste por el impacto de carriles de adelantamiento en PTSF	102
Tabla 33: Factor de ajuste por el efecto de un carril de adelantamiento en ATS	104
Tabla 34: Datos requeridos para la metodología de carreteras multicarril.....	107
Tabla 35: Ajuste por ancho de carril	109
Tabla 36: Ajuste por distancia de obstáculos laterales	110



Tabla 37: Ajuste por tipo de mediana 110

Tabla 38: Ajuste por densidad de puntos de acceso 111

Tabla 39: Ecuaciones que describen las curvas velocidad-flujo 112

Tabla 40: Máximo flujo de servicio bajo condiciones base 113

Tabla 41: Factores de equivalencia de vehículos ligeros en terreno general..... 115

Tabla 42: Factor de equivalencia para vehículos pesados (Et) en ascensos. 116

Tabla 43: Factor de equivalencia para vehículos recreativos (Er) en ascensos 116

Tabla 44: Factores de equivalencia para vehículos (Et) pesado en descensos específicos..... 117

Tabla 45: Nivel de servicio en vías multicarril 120

Tabla 46: Formato de conteo vehicular 129

Tabla 47: Formato de recopilación de datos del aforo vehicular 130

Tabla 48: Formato de datos geométricos 131

Tabla 49: Formato de datos de velocidad..... 132

Tabla 50: Instrumentos de ingeniería 133

Tabla 51: Distancia mínima de adelantamiento para la velocidad seleccionada 137

Tabla 52: Porcentaje de zona de no adelantamiento Tramo I..... 137

Tabla 53: Porcentaje de zona de no adelantamiento Tramo II 138

Tabla 54: Porcentaje de zona de no adelantamiento Tramo III 138

Tabla 55: Porcentaje de zona de no adelantamiento Tramo IV 139

Tabla 56: Porcentaje de zona de no adelantamiento Tramo V 139

Tabla 57: Porcentaje de zona de no adelantamiento Tramo VI..... 140

Tabla 58: Porcentaje de zona de no adelantamiento Tramo VII 140

Tabla 59: Porcentaje de zona de no adelantamiento Tramo VIII 141

Tabla 60: Porcentaje de zona de no adelantamiento Tramo IX..... 141

Tabla 61: Porcentaje de zona de no adelantamiento Tramo X 142

Tabla 62: Promedio de pendientes en el Tramo I..... 143

Tabla 63: Promedio de pendientes en el Tramo II 144

Tabla 64: Promedio de pendientes en el Tramo III 144

Tabla 65: Promedio de pendientes en el Tramo IV 145

Tabla 66: Promedio de pendientes en el Tramo V 145

Tabla 67: Promedio de pendientes en el Tramo VI..... 146

Tabla 68: Promedio de pendientes en el Tramo VII..... 146

Tabla 69: Promedio de pendientes en el Tramo VIII 147

Tabla 70: Promedio de pendientes en el Tramo IX..... 147

Tabla 71: Promedio de pendientes en el Tramo X 148

Tabla 72: Datos geométricos Tramo I..... 149

Tabla 73: Datos geométricos Tramo II 150

Tabla 74: Datos geométricos Tramo III 151

Tabla 75: Datos geométricos Tramo IV 152

Tabla 76: Datos geométricos Tramo V 153



Tabla 77: Datos geométricos Tramo VI..... 154

Tabla 78: Datos geométricos Tramo VII..... 155

Tabla 79: Datos geométricos Tramo VIII 156

Tabla 80: Datos geométricos Tramo IX..... 157

Tabla 81: Datos geométricos Tramo X 158

Tabla 82: Aforo vehicular estación A1- domingo - mañana: Hacia Cusco 161

Tabla 83: Aforo vehicular estación A1 - domingo tarde: Hacia cusco 162

Tabla 84: Aforo vehicular estación A1 - lunes-mañana: Hacia Cusco..... 163

Tabla 85: Aforo vehicular estación A1 - lunes-tarde: Hacia Cusco 164

Tabla 86: Aforo vehicular estación A1 - martes-mañana: Hacia Cusco 165

Tabla 87: Aforo vehicular estación A1 - martes-tarde: Hacia Cusco..... 166

Tabla 88: Aforo vehicular estación A1 - miércoles-mañana: Hacia Cusco..... 167

Tabla 89: Aforo vehicular estación A1 - miércoles tarde: Hacia Cusco 168

Tabla 90: Aforo vehicular estación A1 - jueves mañana: Hacia Cusco 169

Tabla 91: Aforo vehicular estación A1 - jueves tarde: Hacia Cusco..... 170

Tabla 92: Aforo vehicular estación A1 viernes mañana: Hacia Cusco 171

Tabla 93: Aforo vehicular estación A1 - viernes tarde: Hacia Cusco 172

Tabla 94: Aforo vehicular estación A1 - sábado mañana: Hacia Cusco 173

Tabla 95: Aforo vehicular estación A1 – sábado tarde: Hacia Cusco 174

Tabla 96: Aforo vehicular estación A1 – domingo mañana: Hacia Urubamba..... 175

Tabla 97: Aforo vehicular estación A1 domingo-tarde: hacia Urubamba..... 176

Tabla 98: Aforo vehicular estación A1 lunes-mañana: hacia Urubamba..... 177

Tabla 99: Aforo vehicular estación A1 lunes-tarde: hacia Urubamba 178

Tabla 100: Aforo vehicular estación A1 martes-mañana: hacia Urubamba..... 179

Tabla 101: Aforo vehicular estación A1 martes-tarde: hacia Urubamba 180

Tabla 102: Aforo vehicular estación A1 miércoles-mañana: hacia Urubamba..... 181

Tabla 103: Aforo vehicular estación A1 miércoles-tarde: hacia Urubamba 182

Tabla 104: Aforo vehicular estación A1 jueves-mañana: hacia Urubamba 183

Tabla 105: Aforo vehicular estación A1 jueves-tarde: hacia Urubamba..... 184

Tabla 106: Aforo vehicular estación A1 viernes-mañana: hacia Urubamba..... 185

Tabla 107: Aforo vehicular estación A1 viernes-tarde: hacia Urubamba 186

Tabla 108: Aforo vehicular estación A1 sábado-mañana: hacia Urubamba 187

Tabla 109: Aforo vehicular estación A1 sábado-tarde: hacia Urubamba..... 188

Tabla 110: Aforo vehicular estación A2 domingo-mañana: hacia Cusco 189

Tabla 111: Aforo vehicular estación A2 domingo-tarde: hacia Cusco..... 190

Tabla 112: Aforo vehicular estación A2 lunes-mañana: hacia Cusco..... 191

Tabla 113: Aforo vehicular estación A2 lunes-tarde: hacia Cusco 192

Tabla 114: Aforo vehicular estación A2 martes-mañana: hacia Cusco..... 193

Tabla 115: Aforo vehicular estación A2 martes-tarde: hacia Cusco 194

Tabla 116: Aforo vehicular estación A2 miércoles-mañana: hacia Cusco..... 195



Tabla 117: Aforo vehicular estación A2 miércoles-tarde: hacia Cusco 196

Tabla 118: Aforo vehicular estación A2 jueves-mañana: hacia Cusco 197

Tabla 119: Aforo vehicular estación A2 jueves-tarde: hacia Cusco 198

Tabla 120: Aforo vehicular estación A2 viernes-mañana: hacia Cusco 199

Tabla 121: Aforo vehicular estación A2 viernes-tarde: hacia Cusco 200

Tabla 122: Aforo vehicular estación A2 sábado-mañana: hacia Cusco 201

Tabla 123: Aforo vehicular estación A2 sábado-tarde: hacia Cusco..... 202

Tabla 124: Aforo vehicular estación A2 domingo-mañana: hacia Urubamba 203

Tabla 125: Aforo vehicular estación A2 día domingo-tarde: hacia Urubamba 204

Tabla 126: Aforo vehicular estación A2 lunes-mañana: hacia Urubamba 205

Tabla 127: Aforo vehicular estación A2 lunes-tarde: hacia Urubamba 206

Tabla 128: Aforo vehicular estación A2 martes-mañana: hacia Urubamba..... 207

Tabla 129: Aforo vehicular estación A2 martes-tarde: hacia Urubamba 208

Tabla 130: Aforo vehicular estación A2 miércoles-mañana: hacia Urubamba 209

Tabla 131: Aforo vehicular estación A2 miércoles-tarde: hacia Urubamba 210

Tabla 132: Aforo vehicular estación A2 jueves-mañana: hacia Urubamba 211

Tabla 133: Aforo vehicular estación A2 jueves-tarde: hacia Urubamba..... 212

Tabla 134: Aforo vehicular estación A2 viernes-mañana: hacia Urubamba 213

Tabla 135: Aforo vehicular estación A2 viernes-tarde: hacia Urubamba 214

Tabla 136: Aforo vehicular estación A2 sábado-mañana: hacia Urubamba 215

Tabla 137: Aforo vehicular estación A2 sábado-tarde: hacia Urubamba..... 216

Tabla 138: Datos de velocidad N°1 sentido Hacia Urubamba 218

Tabla 139: Datos de velocidad N° 2 sentido Hacia Urubamba 219

Tabla 140: Datos de velocidad N°3 sentido Hacia Urubamba 220

Tabla 141: Datos de velocidad N°1 sentido Hacia Cusco 221

Tabla 142: Datos de velocidad N°2 sentido Hacia Cusco 222

Tabla 143: Datos de velocidad N°3 sentido Hacia Cusco 223

Tabla 144: Datos de velocidad N° 4 sentido Hacia Cusco 224

Tabla 145: Flujo vehicular observado-estación A1 sentido Urubamba-Cusco 225

Tabla 146: Flujo vehicular observado-estación A1 sentido Cusco-Urubamba 226

Tabla 147: Flujo vehicular observado-estación A2 sentido Urubamba-Cusco 227

Tabla 148: Flujo vehicular observado-estación A2 sentido Cusco-Urubamba 228

Tabla 149: Cuadro resumen de la tasa de flujo crítica 229

Tabla 150: Cuadro del volumen horario de máxima demanda..... 229

Tabla 151: Composición de vehículos ligeros 235

Tabla 152: Composición de vehículos pesados..... 235

Tabla 153: Porcentaje de participación en la composición vehicular..... 236

Tabla 154: Porcentaje de participación en la composición vehicular por estación 236

Tabla 155: Numero de intervalos de clase por tamaño de muestra 243

Tabla 156: Distribución de frecuencias sentido hacia Cusco 245



Tabla 157: Distribución de frecuencias sentido hacia Urubamba 246

Tabla 158: Constante correspondiente al nivel de confiabilidad..... 248

Tabla 159: Volumen de vehículos ligeros y pesados en la estación A1 254

Tabla 160: Volumen de vehículos ligeros y pesados en la estación A2 254

Tabla 161: Transito futuro 255

Tabla 162: Composición de vehículos generados 2021 256

Tabla 163: Composición de vehículos generados 2030 257

Tabla 164: Distribución de viajes en el año 2021 257

Tabla 165: Distribución de viajes en el año 2030 257

Tabla 166: Transito generado en el año 2021 258

Tabla 167: Transito generado en el año 2030 258

Tabla 168: Transito proyectado hacia Cusco 2021 259

Tabla 169: Transito proyectado hacia Urubamba 2021 259

Tabla 170: Transito proyectado hacia Cusco 2030 259

Tabla 171: Transito proyectado hacia Urubamba 2030 260

Tabla 172: Composición vehicular del tránsito proyectado 2021 260

Tabla 173: Composición vehicular del tránsito proyectado 2030 260

Tabla 174: Recopilación de datos geométricos y de transito 268

Tabla 175: Conversión de unidades métricas..... 268

Tabla 176: Recopilación de datos geométricos y de transito sistema imperial 269

Tabla 177: Datos necesarios para determinar el factor de ajuste por la pendiente para ATS-situación actual ... 270

Tabla 178: Interpolación del factor de ajuste por la pendiente para ATS en el sentido de análisis-situación actual 270

Tabla 179: Interpolación del factor de ajuste por la pendiente en ascenso específico para ATS en el sentido opuesto-situación actual..... 271

Tabla 180: Interpolación del factor de equivalencia en descenso específico para ATS en el sentido de análisis-situación actual..... 271

Tabla 181: Interpolación del factor de equivalencia para vehículos recreacionales (e_r) para ATS en el sentido opuesto-situación actual..... 272

Tabla 182: Interpolación del factor de equivalencia para vehículos pesados (e_p) para ATS en el sentido opuesto-situación actual..... 272

Tabla 183: Interpolación del factor de ajuste por el porcentaje de zonas de no adelantamiento en el sentido de análisis-situación actual 274

Tabla 184: Interpolación del factor de ajuste por el porcentaje de zonas de no adelantamiento en el sentido de análisis-situación actual 274

Tabla 185: Datos necesarios para determinar el factor de ajuste por pendiente para PTSF-situación actual..... 276

Tabla 186: Interpolación del factor de ajuste por pendiente en el sentido de análisis para PTSF-situación actual 277

Tabla 187: Interpolación del factor de ajuste por pendiente en el sentido opuesto para PTSF – situación actual277

Tabla 188: Interpolación del factor de equivalencia en PTSF en el sentido de análisis-situación actual..... 278



Tabla 189: Interpolación de factores de equivalencia en PTSF en el sentido de opuesto-situación actual 278

Tabla 190: Interpolación de los coeficientes para el BPTSF en el sentido de análisis -situación actual..... 281

Tabla 191: Interpolación de los coeficientes para el BPTSF en el sentido opuesto – situación actual 281

Tabla 192: Interpolación del factor de ajuste por zonas de no adelantamiento para PTSF en ambos sentidos - situación actual..... 283

Tabla 193: Nivel de servicio en el sentido Hacia Urubamba, 2019 285

Tabla 194: Nivel de servicio en el Hacia Cusco, 2019..... 285

Tabla 195 Promedio de nivel de servicio para la carretera de dos carriles en el año 2019 286

Tabla 196: Resultados del análisis de nivel de servicio en ATS de la carretera de dos carriles Chinchero-Urubamba en el año 2019 287

Tabla 197: Resultados del análisis de nivel de servicio en PTSF de la carretera de dos carriles Chinchero-Urubamba en el año 2019 288

Tabla 198: Resultados del nivel de servicio en la situación actual de la carretera Chinchero – Urubamba ,2019 289

Tabla 199: Recopilación de datos geométricos y de transito 2021 290

Tabla 200: Conversión de unidades métricas..... 290

Tabla 201 Recopilación de datos geométricos y de transito en el sistema imperial..... 291

Tabla 202: Datos necesarios para determinar el factor de ajuste por la pendiente para ATS -2021 292

Tabla 203: Interpolación del factor de ajuste por la pendiente del sentido de análisis 2021 292

Tabla 204: Interpolación del factor de ajuste por la pendiente en ascenso específico para ATS en el sentido opuesto 2021 293

Tabla 205: Interpolación del factor de equivalencia en descenso específico para ATS en el sentido de análisis 2021 293

Tabla 206: Interpolación del factor de equivalencia para vehículos recreacionales (E_r) para ATS en el sentido opuesto 2021 294

Tabla 207: Interpolación del factor de equivalencia para vehículos pesados (E_t) para ATS en el sentido opuesto 2021 294

Tabla 208: Interpolación del factor de ajuste por el porcentaje de zonas de no adelantamiento en el sentido Hacia Urubamba-2021 296

Tabla 209: Interpolación del factor de ajuste por zonas de no adelantamiento para ATS Hacia Cusco 296

Tabla 210: Datos necesarios para determinar el factor de ajuste por pendiente para PTSF -2021..... 298

Tabla 211: Interpolación del factor de ajuste por pendiente en el sentido de análisis para PTSF -2021..... 299

Tabla 212: Interpolación del factor de ajuste por pendiente en el sentido opuesto para PTSF – 2021 299

Tabla 213: Interpolación del factor de equivalencia en PTSF en el sentido de análisis-2021..... 300

Tabla 214: Interpolación de factores de equivalencia en PTSF en el sentido de opuesto-2021 300

Tabla 215: Interpolación de los coeficientes para el BPTSF en el sentido Hacia Urubamba 2021 303

Tabla 216: Interpolación de los coeficientes para el BPTSF en el sentido Hacia Cusco 2021 303

Tabla 217: Interpolación del factor de ajuste por zonas de no adelantamiento para PTSF en ambos sentidos -2021 305

Tabla 218: Nivel de servicio en el sentido de Hacia Urubamba en el 2021 307



Tabla 219: Nivel de servicio en el sentido Hacia Cusco en el 2021 307

Tabla 220: Promedio de nivel de servicio para la carretera de dos carriles en el año 2021 308

Tabla 221: Resultados del análisis de nivel de servicio en ATS de la carretera de dos carriles Chinchero-Urubamba en el año 2021 309

Tabla 222: Resultados del análisis de nivel de servicio en PTSF de la carretera de dos carriles Chinchero-Urubamba en el año 2021 310

Tabla 223: Resultados del nivel de servicio en el año 2021 de la carretera Chinchero – Urubamba 311

Tabla 224: Longitud optima del carril de adelantamiento 313

Tabla 225: Longitud efectiva del carril de adelantamiento para ATS y PTSF en el sentido de análisis-2021 314

Tabla 226: Longitud efectiva del carril de adelantamiento para ATS y PTSF en el sentido opuesto-2021 314

Tabla 227: Longitud efectiva del carril de adelantamiento interrumpida para ATS y PTSF en el sentido de análisis-2021 315

Tabla 228: Longitud efectiva del carril de adelantamiento interrumpida para ATS y PTSF en el sentido opuesto - 2021 315

Tabla 229: Resumen de los segmentos en el sentido de análisis-2021 315

Tabla 230: Resumen de los segmentos en el sentido opuesto-2021 315

Tabla 231: Interpolación del factor de ajuste por el impacto del carril de adelantamiento para PTSF en el sentido de análisis-2021 316

Tabla 232: Interpolación del factor de ajuste por el impacto del carril de adelantamiento para PTSF en el sentido opuesto-2021 316

Tabla 233: Interpolación del factor de ajuste por el impacto del carril de adelantamiento para ATS en el sentido de análisis-2021 317

Tabla 234: Interpolación del factor de ajuste por el impacto del carril de adelantamiento para ATS en el sentido opuesto-2021 318

Tabla 235: Nivel de servicio con carril de adelantamiento en el sentido Hacia Urubamba 2021 319

Tabla 236: Nivel de servicio con carril de adelantamiento en el sentido Hacia Cusco 2021 319

Tabla 237: Promedio de nivel de servicio para la carretera de dos carriles en el año 2021 con carriles de adelantamiento 320

Tabla 238: Resultados del análisis de nivel de servicio en ATS de la carretera de dos carriles con un carril de adelantamiento de la carretera Chinchero-Urubamba en el año 2021 321

Tabla 239: Resultados del análisis de nivel de servicio en PTSF de la carretera de dos carriles con un carril de adelantamiento de la carretera Chinchero-Urubamba en el año 2021 322

Tabla 240: Resultados del nivel de servicio con carriles de adelantamiento al inicio de operaciones del AICC en la carretera Chinchero – Urubamba 2021 323

Tabla 241: Recopilación de datos para un análisis multicarril en el sistema métrico -2021 324

Tabla 242: Recopilación de datos para un análisis multicarril en el sistema imperial-2021 325

Tabla 243: Factor de ajuste por ancho de carril-2021 325

Tabla 244: Factor de ajuste por obstáculos laterales-2021 326

Tabla 245: Factor de ajuste por tipo de mediana-2021 326

Tabla 246: Factor de ajuste por densidad de puntos de acceso-2021 326



Tabla 247: Máximo flujo de servicio en el sentido de análisis-2021 328

Tabla 248: Máximo flujo de servicio en el sentido opuesto-2021 328

Tabla 249: Factor de ajuste por vehículos pesados y recreacionales 329

Tabla 250: Factor de ajuste por vehículos pesados Et- 2021 329

Tabla 251: Factor de ajuste por vehículos recreacionales Er - 2021 329

Tabla 252: Factor de ajuste por tipo de población conductora..... 330

Tabla 253: Nivel de servicio determinado para el sentido de análisis-2021 333

Tabla 254: Nivel de servicio determinado para el sentido opuesto-2021..... 333

Tabla 255: Promedio de nivel de servicio con cuatro carriles en el año 2021 333

Tabla 256: Resultados del análisis de nivel de servicio de una carretera multicarril en la carretera Chinchero-Urubamba en el año 2021 334

Tabla 257: Resultados del nivel de servicio con una vía multicarril en la carretera Chinchero – Urubamba con el inicio de operaciones del AICC 2021 335

Tabla 258: Recopilación de datos para un análisis multicarril en sistema métrico -2030..... 336

Tabla 259: Recopilación de datos para un análisis multicarril en sistema imperial-2030..... 337

Tabla 260: Factor de ajuste por ancho de carril 2030 337

Tabla 261: Factor de ajuste por obstáculos laterales-2030..... 338

Tabla 262: Factor de ajuste por tipo de mediana-2030 338

Tabla 263: Factor de ajuste por densidad de puntos de acceso-2030..... 338

Tabla 264: Máximo flujo de servicio en el sentido de análisis-2030 340

Tabla 265: Máximo flujo de servicio en el sentido opuesto..... 340

Tabla 266: Factor de ajuste por vehículos pesados y recreacionales 2030..... 341

Tabla 267: Factor de ajuste por vehículos pesados -2030..... 341

Tabla 268: Factor de ajuste por vehículos recreacionales-2030..... 341

Tabla 269: Factor de ajuste por tipo de conductores..... 342

Tabla 270: Nivel de servicio determinado para el sentido de análisis-2030 345

Tabla 271: Nivel de servicio determinado para el sentido opuesto-2030..... 345

Tabla 272: Promedio de nivel de servicio con cuatro carriles en el año 2030 345

Tabla 273: Resultados del análisis del nivel de servicio de una carretera multicarril en la carretera Chinchero – Urubamba en el año 2030 346

Tabla 274: Resultados del nivel de servicio con una vía multicarril en la carretera Chinchero – Urubamba en el año horizonte 2030 con el AICC..... 347

Tabla 275: Resultados del Tramo I km 0+000 al km 3+000 348

Tabla 276: Resultados del Tramo II km 3+000 al km 6+000..... 349

Tabla 277: Resultados del Tramo III km 6+000 al km 9+000 350

Tabla 278: Resultados del Tramo IV km 9+000 al km 12+000 351

Tabla 279: Resultados del Tramo V km 12+000 al km 15+000 352

Tabla 280: Resultados del Tramo VI km 15+000 al km 18+000 353

Tabla 281: Resultados del Tramo VII km 18+000 al km 21+000..... 354

Tabla 282: Resultados del Tramo VIII km 21+000 al km 24+000 355



Tabla 283: Resultados del Tramo IX km 24+000 al km 27+000	356
Tabla 284: Resultados del Tramo X km 27+000 al km 32+100	357



Índice de figuras

Figura 1: Mapa de ubicación regional.....	22
Figura 2: Ubicación de la carretera Chinchero-Urubamba.....	23
Figura 3: Ubicación del Aeropuerto Internacional de Chinchero.....	24
Figura 4: Ubicación del Tramo I del área de estudio	25
Figura 5: Ubicación del Tramo II del área de estudio	25
Figura 6: Ubicación del Tramo III del área de estudio.....	26
Figura 7: Ubicación del Tramo IV del área de estudio	26
Figura 8: Ubicación del Tramo V del área de estudio.....	27
Figura 9: Ubicación del Tramo VI del área de estudio	27
Figura 10: Ubicación del Tramo VII del área de estudio	28
Figura 11: Ubicación del Tramo VIII del área de estudio.....	28
Figura 12: Ubicación del Tramo IX del área de estudio	29
Figura 13: Ubicación del Tramo X del área de estudio.....	29
Figura 14: Vehículo ligero	39
Figura 15: Vehículo pesado	40
Figura 16: Cuerpo tridimensional de una carretera.....	42
Figura 17: Tipos de alineaciones en planta	43
Figura 18: Elemento de trazado en alzado	44
Figura 19: Sección transversal genérica.....	45
Figura 20: Carreteras de dos carriles de Clase I.....	48
Figura 21: Carreteras de dos carriles de Clase II.....	48
Figura 22: Carreteras de dos carriles de Clase III	49
Figura 23: Vía urbana multicarril dividida, y sin división.	50
Figura 24: Autopista urbana multicarril y autopista rural multicarril	50
Figura 25: Densidad o concentración.....	58
Figura 26: Nivel de servicio A y B	62
Figura 27: Nivel de servicio C y D	62
Figura 28: Nivel de servicio E y F	62
Figura 29: Demanda horaria de tráfico en el aeropuerto en 2021	69
Figura 30: Demanda horaria de tráfico en el aeropuerto en 2030	69
Figura 31: Demanda horaria de tráfico en el aeropuerto en 2060	70
Figura 32: Flujograma de metodología del HCM 2010 para carreteras de dos carriles	77
Figura 33: Efecto de un carril de adelantamiento.....	100
Figura 34: Efecto del carril de adelantamiento en el PTSF.....	103
Figura 35: Impacto del carril de adelantamiento en ATS.....	104
Figura 36: Flujograma de metodología para vías multicarril	107
Figura 37: Curva velocidad-flujo para una vía multicarril.....	113
Figura 38: Flujograma de la investigación.....	128
Figura 39: Topografía general.....	135



Figura 40: Eje de estudio en Google Earth..... 136

Figura 41: Verificación de anchos de carril 136

Figura 42: Etiqueta de curvas en Civil 3d 137

Figura 43: Cuadro de parámetros de curvas..... 137

Figura 44: Ubicación de los puntos de toma de datos 161

Figura 45: Ubicación de punto de muestreo..... 218

Figura 46: Variación horaria del volumen, estación A2- sentido Hacia Cusco..... 231

Figura 47: Variación diaria del volumen estación A2-sentido Hacia Cusco..... 231

Figura 48: Variación horaria del volumen-v. estación A2- sentido Hacia Urubamba 232

Figura 49: Variación diaria del volumen estación A2-sentido Hacia Urubamba 232

Figura 50: Variación horaria del volumen-v. Estación A1- sentido Hacia Cusco..... 233

Figura 51: Variación diaria del volumen estación A1-sentido Hacia Cusco..... 233

Figura 52: Variación horaria del volumen-v. Estación A1- sentido Hacia Urubamba..... 234

Figura 53: Variación diaria del volumen estación A1-sentido Hacia Urubamba 234

Figura 54: Composición vehicular estación A1 hacia Cusco 238

Figura 55: Composición vehicular estación A1 hacia Urubamba 238

Figura 56: Composición vehicular estación A2 hacia Cusco 239

Figura 57: Composición vehicular estación A2 hacia Urubamba 239

Figura 58: Porcentaje de vehículos pesados estación A1 hacia Cusco..... 240

Figura 59: Porcentaje de vehículos pesados estación a1 hacia Urubamba 240

Figura 60: Porcentaje de vehículos pesados estación A2 hacia cusco 241

Figura 61: Porcentaje de vehículos pesados estación A2 hacia Urubamba..... 241

Figura 62: Porcentaje de vehículos pesados estación A1 242

Figura 63: Porcentaje de vehículos pesados estación A2 242

Figura 64: Polígono de frecuencias de velocidad sentido Hacia Cusco 251

Figura 65: Curva de frecuencias acumuladas de velocidad Hacia Cusco 251

Figura 66: Curva de frecuencias observadas de velocidad Hacia Cusco..... 252

Figura 67: Polígono de frecuencias de velocidad sentido Hacia Urubamba 252

Figura 68: Curva de frecuencias acumuladas de velocidad Hacia Urubamba..... 253

Figura 69: Curva de frecuencias observadas de velocidad Hacia Urubamba..... 253

Figura 70: Distribución de vehículos del aeropuerto 257

Figura 71: Tránsito futuro en la estación A1..... 262

Figura 72: Tránsito futuro en la estación A2..... 262

Figura 73: Transito generado por el AICC hacia Cusco 263

Figura 74: Transito generado por el AICC Hacia Urubamba..... 263

Figura 75: Transito proyectado por tramos para el año 2021..... 264

Figura 76: Transito proyectado por tramos para el año 2030..... 264

Figura 77: Composición vehicular tramo I, II año 2021 265

Figura 78: Composición vehicular tramo III, IV, V año 2021 265

Figura 79: Composición vehicular tramo VI, VII, VIII, IX, X año 2021 266



Figura 80: Composición vehicular tramo I, II año 2030 266

Figura 81: Composición vehicular tramo III, IV, V año 2030 267

Figura 82: Composición vehicular tramo VI, VII, VIII, IX, X año 2030..... 267

Figura 83: Ubicación de carril de adelantamiento en el Tramo III 314

CAPÍTULO 1. Planteamiento del problema

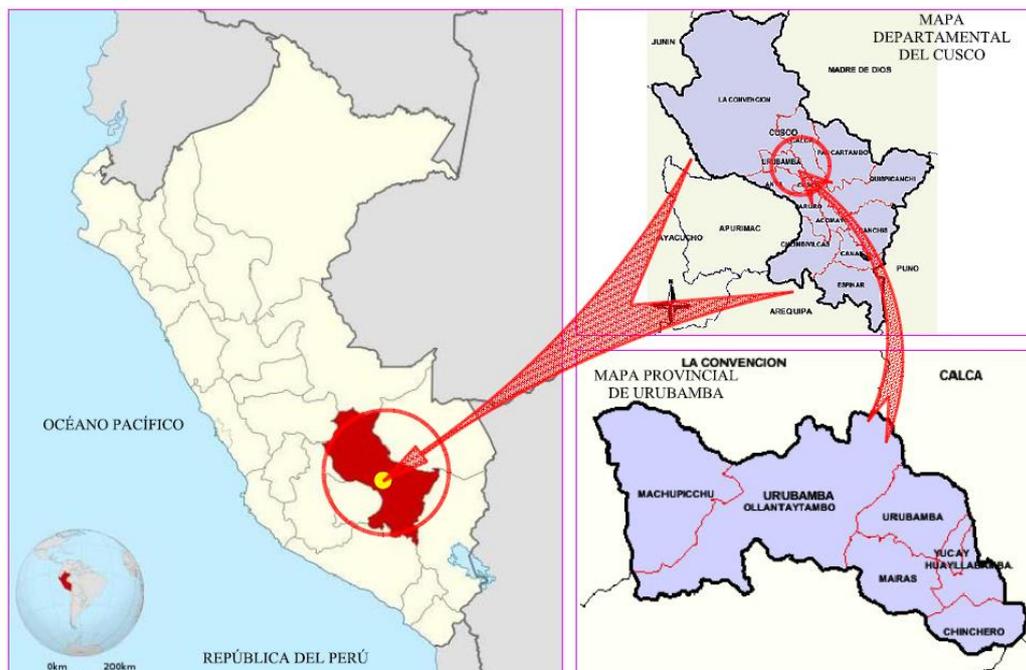
1.1. Identificación del problema

1.1.1. Ubicación temporal y geográfica del estudio

La investigación se encuentra enmarcada geográficamente en:

- País: Perú
- Departamento: Cusco
- Provincia: Urubamba
- Distritos: Chinchero, Urubamba

Figura 1: Mapa de ubicación regional



Fuente: Elaboración Propia

Específicamente se realizó en 32 kilómetros de la carretera Chinchero – Urubamba, cuyas coordenadas son:

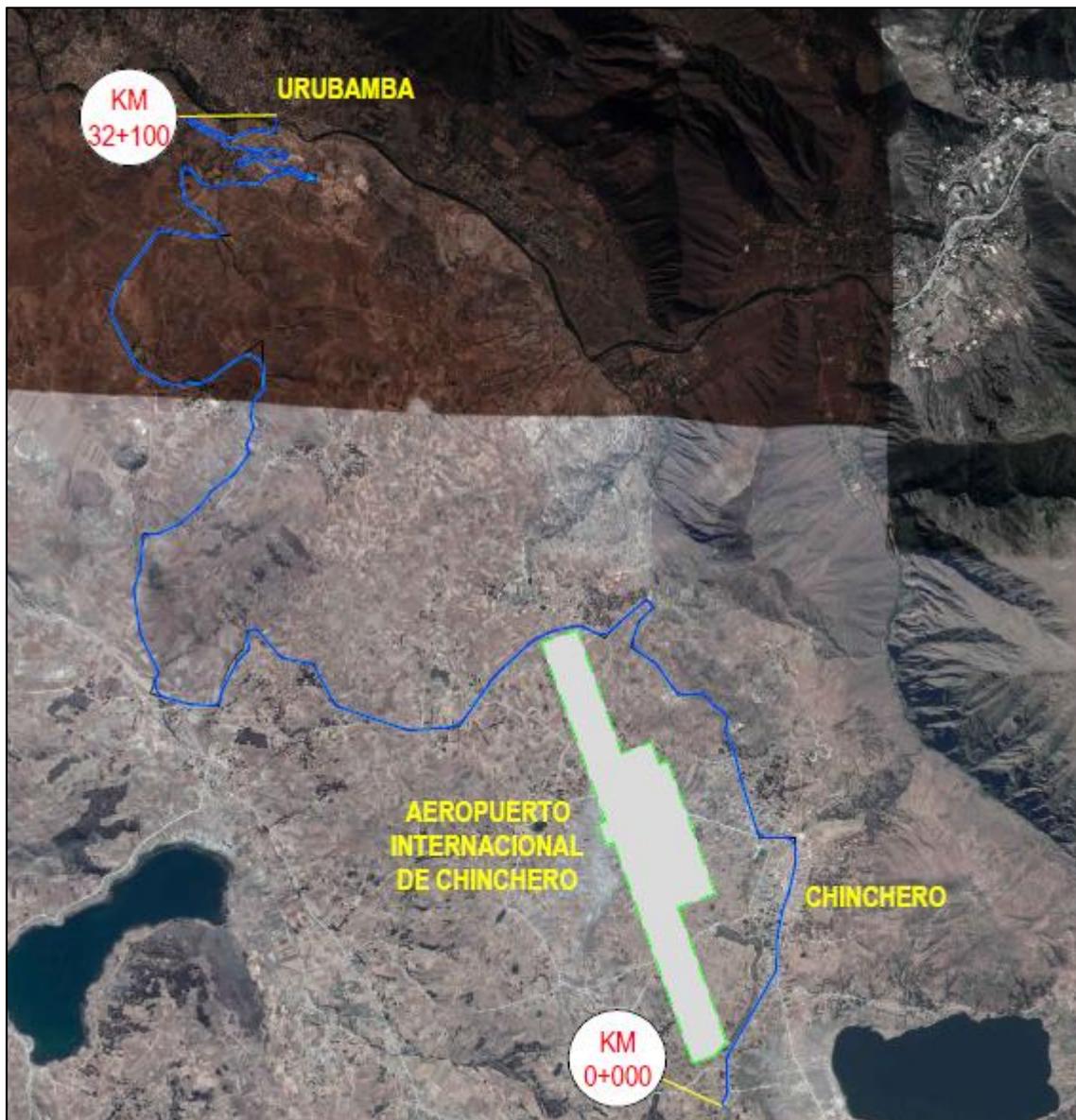
Inicio de carretera: Chinchero

- Geográficas: Latitud, $13^{\circ}25'14.14''S$ - Longitud: $72^{\circ} 3'31.94''O$
- UTM: Este: 818520.949 m E - Norte: 8514453.694 m N

Fin de carretera: Urubamba

- Geográficas: Latitud, $13^{\circ}18'38.49''S$ - Longitud: $72^{\circ} 6'38.11''O$
- UTM: Este: 813057.989 m E - Norte: 8526687.170 m N

Figura 2: Ubicación de la carretera Chinchero-Urubamba



Fuente: Elaboración propia

1.1.2. Descripción del problema

Actualmente existe una gran afluencia de turistas hacia la ciudad de Cusco, evidenciado en las cifras del (Ministerio de Comercio Exterior y Turismo, 2017), las cuales detallan que durante el año 2017 se registró 2'297'982 visitantes a los principales recursos turísticos. Motivo por el cual, junto a otros factores socio económicos, el gobierno peruano mediante la agencia de Promoción de la Inversión Privada (ProInversión) diseñaron un proyecto denominado "Mejoramiento y ampliación del servicio aeroportuario en la Región Cusco mediante el nuevo Aeropuerto Internacional de Chinchero – Cusco AICC", La ubicación de este proyecto se puede observar en la **Figura 3**.

El objetivo principal que pretende alcanzar el nuevo Aeropuerto es la mejora de la capacidad de la infraestructura aeroportuaria en la Región del Cusco, de tal forma que se permita un incremento sostenible del turismo interno y externo en la Región del Cusco y por ende en el Perú, así como el propio desarrollo local y regional del área de influencia del Proyecto. (ProInversión, 2013)

Figura 3: Ubicación del Aeropuerto Internacional de Chinchero



Fuente: (Agencia de Promoción de la Inversión Pública, 2016)

De acuerdo con este objetivo, el nuevo aeropuerto será un nuevo polo generador de desarrollo, que modificará de forma directa el entorno en el cual se encuentra, siendo la carretera de dos carriles P3-28F Chinchero – Urubamba uno de los principales elementos que se verá afectado. De acuerdo con el (Transportation Research Board, 2010) este tipo de carreteras presentan una característica única: la calidad de operación disminuye precipitadamente a medida que aumenta la demanda de flujo vehicular. Por esta razón, en la mayoría de los casos, la mala calidad de operación ha llevado al mejoramiento o reconstrucción de la carretera antes de alcanzar la capacidad de la vía.

Motivo por el cual fue necesario evaluar el impacto vial se generará sobre la carretera P3-28F debido al incremento vehicular producto del nuevo aeropuerto, y determinar la mejor solución que mitigue los efectos negativos.

En la presente investigación, debido a la similitud entre las características geométricas de la carretera, se segmentó en un total de diez tramos.

El Tramo I es considerado desde la progresiva: 0+000 a la 3+000, con una longitud de tres kilómetros, posee un ancho típico de plataforma de 6.10 m, con una berma de 0.10 m, una pendiente mínima de 1.00 %, y una pendiente máxima de 4.00 %.

Figura 4: Ubicación del Tramo I del área de estudio



Fuente: Elaboración Propia

El Tramo II es considerado desde la progresiva: 3+000 a la 6+000, con una longitud de tres kilómetros, posee un ancho típico de plataforma de 5.90 m, con una berma de 0.30 m, una pendiente mínima de 1.00 %, y una pendiente máxima de 5.50 %.

Figura 5: Ubicación del Tramo II del área de estudio



Fuente: Elaboración propia

El Tramo III es considerado desde la progresiva: 6+000 a la 9+000, con una longitud de tres kilómetros, posee un ancho típico de plataforma de 6.00 m, con una berma de 0.30 m, una pendiente mínima de 0.97 % y una pendiente máxima de 8.00 %.

Figura 6: Ubicación del Tramo III del área de estudio



Fuente: Elaboración propia

El Tramo IV es considerado desde la progresiva: 9+000 a la 12+000, con una longitud de tres kilómetros, posee un ancho típico de plataforma de 5.60 m, con una berma de 0.20 m, una pendiente mínima de 2.00 % y una pendiente máxima de 6.30 %.

Figura 7: Ubicación del Tramo IV del área de estudio



Fuente: Elaboración propia

El Tramo V es considerado desde la progresiva: 12+000 a la 15+000, con una longitud de tres kilómetros, posee un ancho típico de plataforma de 5.80 m, con una berma de 0.10 m, una pendiente mínima de 3.00 % y una pendiente máxima de 6.50 %.

Figura 8: Ubicación del Tramo V del área de estudio



Fuente: Elaboración propia

El Tramo VI es considerado desde la progresiva: 15+000 a la 18+000, con una longitud de tres kilómetros, posee un ancho típico de plataforma de 5.80 m, con una berma de 0.20 m, una pendiente mínima de 0.50 % y una pendiente máxima de 6.00 %.

Figura 9: Ubicación del Tramo VI del área de estudio



Fuente: Elaboración propia

El tramo VII es considerado desde la progresiva: 18+000 a la 21+000, con una longitud de tres kilómetros, posee un ancho típico de plataforma de 5.80 m, con una berma de 0.15 m, una pendiente mínima de 2.00 % y una pendiente máxima de 7.50 %

Figura 10: Ubicación del Tramo VII del área de estudio



Fuente: Elaboración propia

El tramo VIII es considerado desde la progresiva: 21+000 a la 24+000, con una longitud de tres kilómetros, posee un ancho típico de plataforma de 5.80 m, con una berma de 0.20 m, una pendiente mínima de 2.50 % y una pendiente máxima de 6.00 %

Figura 11: Ubicación del Tramo VIII del área de estudio



Fuente: Elaboración propia

El tramo IX es considerado desde la progresiva: 24+000 a la 27+000, con una longitud de tres kilómetros, posee un ancho típico de plataforma de 5.90 m, con una berma de 0.30 m, una pendiente mínima de 3.00 % y una pendiente máxima de 4.50 %

Figura 12: Ubicación del Tramo IX del área de estudio



Fuente: Elaboración propia

El tramo X es considerado desde la progresiva: 27+000 a la 32+100, con una longitud de cinco kilómetros, posee un ancho típico de plataforma de 6.00 m, con una berma de 0.10 m, una pendiente mínima de 1.00 % y una pendiente máxima de 9.00 %.

Figura 13: Ubicación del Tramo X del área de estudio



Fuente: Elaboración propia



1.1.3. Formulación interrogativa del problema

1.1.3.1. Formulación interrogativa del problema general

¿Cómo variará el nivel de servicio actual de la carretera Chinchero-Urubamba con la adición del tráfico generado por el Aeropuerto Internacional de Chinchero y que sección transversal logrará mantener un nivel de servicio B durante el inicio de operaciones del nuevo aeropuerto y un nivel de servicio C en el año horizonte 2030, de acuerdo con la metodología HCM 2010?

1.1.3.2. Formulación interrogativa de los problemas específicos

1.1.3.2.1. Problema específico N°1

¿Cuál es el nivel de servicio de la infraestructura vial existente Chinchero–Urubamba de acuerdo con la metodología HCM 2010?

1.1.3.2.2. Problema específico N°2

¿Cuál será el nivel de servicio de la infraestructura vial existente Chinchero – Urubamba durante el inicio de operaciones del Aeropuerto Internacional de Chinchero, de acuerdo con la metodología HCM 2010?

1.1.3.2.3. Problema específico N°3

¿Qué sección transversal producirá un nivel de servicio B en la carretera Chinchero–Urubamba, durante el inicio de operaciones del Aeropuerto Internacional de Chinchero, de acuerdo con la Metodología HCM 2010?

1.1.3.2.4. Problema específico N°4

¿Qué sección transversal producirá un nivel de servicio C en la carretera Chinchero–Urubamba, en el año horizonte 2030 con el Aeropuerto Internacional de Chinchero, de acuerdo con la Metodología HCM 2010?



1.2. Justificación e Importancia de la investigación

1.2.1. Justificación técnica

Desde el punto de la Ingeniería Civil, la presente tesis es una guía para realizar investigaciones sobre planificación vial para cualquier ingeniero civil, a su vez aporta literatura técnica que actualmente se encuentra en el idioma inglés.

1.2.2. Justificación social

Desde el punto de vista de la sociedad, la presente investigación es un sustento técnico y especializado, para priorizar el mejoramiento de la carretera Chinchero-Urubamba y acelerar su construcción, la cual será de beneficio integral para toda nuestra región.

1.2.3. Justificación por viabilidad

Aunque en su mayoría la base teórica de la ingeniería de transportes se encuentra en idioma inglés, es accesible y las metodologías realizadas en Estados Unidos son validadas internacionalmente motivo por el cual son aplicables a nuestro entorno.

1.2.4. Justificación por relevancia

El Aeropuerto Internacional de Chinchero es un proyecto de gran envergadura y de un gran impacto, el cual modificara el entorno de Cusco, por lo cual fue justificado y necesario realizar una investigación más detallada del impacto vial sobre la carretera Chinchero – Urubamba.

De esta manera evidenciar las deficiencias de este sistema vial, y determinar qué solución vial es suficiente para mitigar los impactos negativos, durante la puesta en servicio del Aeropuerto como en el futuro, basados en la metodología HCM 2010

1.3. Limitaciones de la Investigación

1.3.1. Limitaciones geográficas

La presente investigación se limita a 32.1 km de la carretera P3-28F Chinchero – Urubamba, ubicada en el departamento de Cusco, y a sus condiciones existentes al año de publicación.

1.3.2. Limitaciones metodológicas

El procedimiento metodológico se encuentra limitado al manual norteamericano *Highway Capacity Manual 2010* publicado en Estados Unidos, desarrollados por el *Institute of Transportation Engineers*.



1.3.3.Limitaciones de datos

Debido a la falta de una base de datos semanal, mensual o anual de los volúmenes de tránsito, ni velocidades de marcha en las distintas carreteras existentes, la investigación se limitó a los datos obtenidos durante el periodo de recolección de datos de la carretera existente Chinchero-Urubamba de la presente tesis.

1.4. Objetivos de la investigación

1.4.1.Objetivo general

Determinar el impacto en el nivel de servicio de la carretera Chinchero-Urubamba, producto del tráfico generado por el Aeropuerto Internacional Chinchero y Determinar que sección transversal lograra un nivel de servicio B durante la puesta en marcha del aeropuerto y un nivel de servicio C en el año horizonte 2030, de acuerdo con la metodología HCM 2010.

1.4.2.Objetivos específicos

1.4.2.1. Objetivo específico N°1

Determinar el nivel de servicio de la infraestructura vial existente Chinchero -Urubamba.

1.4.2.2. Objetivo específico N°2

Determinar el nivel de servicio de la Infraestructura vial existente Chinchero - Urubamba durante el inicio de operaciones del Aeropuerto Internacional de Chinchero.

1.4.2.3. Objetivo específico N°3

Determinar la sección transversal que producirá un nivel de servicio B en la carretera Chinchero - Urubamba durante el inicio de operaciones del Aeropuerto Internacional de Chinchero.

1.4.2.4. Objetivo específico N°4

Determinar la sección transversal que producirá un nivel de servicio C en la carretera Chinchero - Urubamba en el año horizonte 2030 con el Aeropuerto Internacional Chinchero.



CAPÍTULO 2. Marco teórico

2.1. Antecedentes de la tesis

2.1.1. Antecedentes a nivel nacional

2.1.1.1. Antecedente Nacional N°1

Autor: *ALG Europraxis Transportation Infrastructure & Logistic*

Título: “Contratación de un Consultor Integral para el Concurso de Proyectos Integrales para la entrega en concesión al sector privado del Aeropuerto Internacional de Chinchero – Cusco (AICC)”

Estudios de Preinversión a nivel de Perfil y Factibilidad del Proyecto

Institución: a servicio de ProInversión

El objetivo del estudio fue evaluar la viabilidad, y desarrollar todos los estudios de ingeniería necesarios para poder desarrollar con éxito el proyecto. “Mejoramiento y ampliación del servicio aeroportuario en la Región Cusco mediante el nuevo Aeropuerto Internacional de Chinchero – Cusco”.

Aporte al tema de investigación:

En el estudio se desarrolló la demanda y la oferta de pasajeros que generara el nuevo Aeropuerto Internacional de Chinchero, así como el volumen vehicular en el día de máxima demanda, los cuales fueron necesarios para determinar el tránsito generado y evaluar el impacto de esta nueva infraestructura durante su inicio de operaciones y en el año horizonte 2030.

2.1.1.2. Antecedente Nacional N°2:

Autor: Vargas Meza, Paul Gerardo

Título: “Evaluación de la accidentabilidad en la carretera nacional PE-28 F, aplicando el modelo de predicción de accidentes para vías rurales de dos carriles - Highway Safety Manual HSM 2010 y propuesta de solución.”

Tesis para optar el título de Ingeniero Civil

Institución: Universidad Andina del Cusco

El objetivo del proyecto de tesis fue evaluar la incidencia de accidentes de tránsito en la carretera nacional PE-28F con el fin de identificar los segmentos adversos a la seguridad vial



y dar una solución pertinente, mediante la metodología norteamericana del Highway Safety Manual, llegando a la conclusión el tramo de Cachimayo-Chinchero eran medianamente seguros y los tramos de Chinchero-Maras eran inseguros por lo cual se dio propuestas de mitigación de accidentes que podrían reducir al 40.33% el riesgo de accidentes viales

Aporte al tema de investigación:

De acuerdo a los aforos realizados por (Vargas Meza, 2018) el entre el 75% y 80% de los volúmenes vehiculares se encuentran entre las 06:00 am hasta las 20:00 horas, con las horas pico en este horario, motivo por el cual en la presente investigación solo se realizaron aforos durante estos horarios ya que se consideran con mayor incidencia.

2.1.2. Antecedentes a nivel internacional

2.1.2.1. Antecedente Internacional N°1

Autor: Vela Morales, Francisco Guillermo

Título: “Estudios de Impacto Vial. Marco Conceptual.”

Tesis para optar el título de Maestro en Ciencias de Ingeniera Vial.

Institución: Universidad de San Carlos de Guatemala

El objetivo del estudio de acuerdo a (Vela Morales, 2008) fue desarrollar un marco conceptual para la realización y revisión de impactos de transito al sistema vial por nuevos desarrollos industriales, comerciales, residenciales o de uso mixto construidos, con la que se identificaran cuáles son las contribuciones de una proyecto o desarrollo en particular a la red vial adyacente a él.

Dentro del trabajo de investigación se propone la metodología que debe seguirse para la elaboración de los estudios de impacto vial. Esto es necesario ya que en nuestro medio no se cuenta con estudios y literatura adecuada para el desarrollo de estos temas.

Entre sus conclusiones menciona la necesidad de realizar e implementar los estudios de impacto vial ya que todas las obras físicas generan impactos viales.

Aporte al proyecto de tesis:

Uno de sus mayores aportes es el proceso metodológico necesario para un estudio de impacto vial que está relacionada con todo el marco conceptual, esta misma metodología fue aplicada en la presente investigación con el fin de tener una base sólida y no cometer errores.

2.2. Aspectos Teóricos Pertinentes

2.2.1. Estudio de impacto vial

Según (Institute of Transportation Engineers, 2010) son estudios elaborados para evaluar el impacto en el transporte de desarrollos propuestos (pueden ser nuevas edificaciones, fabricas, centros comerciales, entre otros) o cambios en el uso de suelo, también podrían ser requeridos para desarrollar cambios en la infraestructura de transporte como nuevas carreteras o el ensanchamiento de estas mismas. Los estudios de impacto vial mediante la planificación del transporte proyectan la futura demanda de transporte, evalúa el impacto del cambio en la demanda y sugiere formas para mitigar los efectos adversos del cambio de suelo en definidas áreas geográficas.

El (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2018) define como aquel estudio dirigido a identificar los cambios que se generan en el tránsito vehicular y peatonal existente, como consecuencia de la implementación de un proyecto o instalación dentro o fuera del derecho de día de la carretera, y establecer la solución para mitigar los impactos que puedan producirse por su funcionamiento.

Para desarrollar un correcto estudio de impacto vial se debe tener claro las características de la demanda y oferta del transporte:

2.2.1.1. Características de la demanda de transporte

La demanda de transporte es descrita por (Ortúzar & Willumsen, 2008) como altamente cualitativa y diferenciada, debido a que existe una amplia gama de demandas específicas de transporte que se diferencian por hora del día, día de la semana, motivo del viaje, tipo de mercancía, etcétera. Otra característica es que es una demanda derivada, es decir, no es un fin en sí misma, con la posible excepción del turismo, la gente viaja para satisfacer ciertas necesidades en sus destinos (trabajo, salud, entretenimiento). Finalmente, la demanda de transporte tiene lugar con relación al espacio. Aunque parece trivial, es la distribución de las actividades en el espacio lo que provoca la demanda de transporte.

2.2.1.2. Características de la oferta del transporte.

La primera característica de la oferta de transporte es que es un servicio y no una mercancía; por lo tanto, no se puede almacenar para ser utilizada cuando exista una demanda mayor. Un servicio de transporte tiene que ser consumido cuándo y dónde se produce, si no, pierde su beneficio. Por esta razón es muy importante estimar la demanda con la mayor precisión



posible para así ahorrar recursos ajustando la oferta de servicios de transporte a ella. Muchas características de los sistemas de transporte provienen de su naturaleza como servicio. En términos muy generales, un sistema de transporte requiere un número de activos fijos (la infraestructura) y un número de unidades móviles (los vehículos). Es la combinación de ambos, junto con una serie de normas para su operación, lo que posibilita el movimiento de personas y mercancías. (Ortúzar & Willumsen, 2008)

La provisión de infraestructura de transporte es particularmente importante desde el punto de vista de la oferta. La infraestructura de transporte es un “sistema unitario”, en el sentido de que no se puede concebir media pista de aterrizaje o la tercera parte de una estación de ferrocarril. Ciertamente, en algunos casos, puede haber razones suficientes para proveer gradualmente infraestructura a medida que crece la demanda. Por ejemplo, se puede empezar con una carretera sin pavimento, mejorarla más adelante con una o dos vías mediante un tratamiento superficial; luego una carretera sencilla o autovía bien construida, para finalizar con una carretera a nivel de autopista. De esta forma, la provisión de la infraestructura puede ajustarse y adecuarse a la demanda, evitándose así tempranas inversiones en instalaciones costosas innecesarias. Esto no es tan sencillo en otras áreas como, por ejemplo, aeropuertos, líneas ferroviarias, de metro, etcétera. (Ortúzar & Willumsen, 2008)

2.2.2. Sistema de transporte

(Roess, Prassas, & McShane, 2011) Indica la importancia de los sistemas de transportes ya que son el mayor componente de la economía y tienen un enorme impacto en el desarrollo de la sociedad y la eficiencia de la economía en general, el uso del transporte mediante automóviles ha tenido un considerable crecimiento, dando un relativo vencimiento a los sistemas de autopistas y a la dificultad de tratar de aumentar capacidad a los sistemas, particularmente en las áreas urbanas, el constante crecimiento de vehículos por kilómetros viajados lleva directamente a incrementar la congestión en las autopistas.

(Cal & Mayor, 2007) Estructura el sistema de transporte en una red compuesta por:

2.2.2.1. Las terminales

Son aquellos puntos donde el viaje o embarque comienza y termina, o donde tiene lugar un cambio de unidad transportadora o modo de transporte. Se tienen las siguientes terminales:

- Grandes: aeropuertos, puertos, terminales de autobuses y de carga, estaciones ferroviarias y estacionamientos en edificios.
- Pequeños: plataformas de carga, paradas de autobuses y garajes residenciales.



- Informales: estacionamientos en la calle y zonas de carga.
- Otros: tanques de almacenamiento y depósitos

2.2.2.2. Las conexiones o medios

Son aquellas partes o elementos fijos, que conectan las terminales, sobre los cuales se desplazan las unidades transportadoras.

Pueden ser de dos tipos:

- Conexiones físicas: carreteras, calles, rieles, ductos, rodillos y cables.
- Conexiones navegables: mares, ríos, el aire y el espacio.

2.2.2.3. Las unidades transportadoras

Son las unidades móviles en las que se desplazan las personas y las mercancías. Por ejemplo:

- Vehículos: automotores, trenes, aviones, embarcaciones y vehículos no motorizados.
- Cabinas, bandas, motobombas, la presión y la gravedad

2.2.3. Sistema vial

(Roess, Prassas, & McShane, 2011) Establece que el sistema vial está compuesto por cinco componentes críticos que interactúan en un sistema de tránsito. Las características geométricas y de las corrientes de tránsito son fuertemente influenciadas por las características y limitaciones de cada uno de estos elementos, los cuales son:

- Usuario: Conductores, peatones, ciclistas y pasajeros
- Vehículos: Privados y Comerciales
- Camino: Calles y Autopistas
- Dispositivos de control de tránsito
- El entorno en general.

2.2.3.1. Usuario

2.2.3.1.1. Conductor

Según (Bañón Blázquez & Beviá García, 2000) , Técnicamente, podría definirse como aquel sujeto que maneja el mecanismo de dirección o va al mando de un vehículo. Empleando términos más gráficos, podría decirse que el conductor es el cerebro del vehículo, conducir es una tarea compleja que involucra una variedad de habilidades, la más importante es recibir y procesar información para tomar decisiones rápidamente, estas tareas se agrupan en tres



categorías principales: control (velocidad y dirección), orientación (mantener un camino seguro y en el carril correcto) y navegación (planeamiento y realización de un viaje).

Un parámetro usado para cuantificar la velocidad de procesamiento de información es el tiempo de percepción reacción, que representa cuán rápido los conductores responde ante una situación de emergencia. Los parámetros directamente asociados con el tiempo de reacción son la distancia de visibilidad: de parada, de cruce y de decisión. (Bañón Blázquez & Beviá García, 2000) ,

2.2.3.2. Vehículo

El vehículo es el nexo entre el conductor que lo maneja y la vía que lo contiene, por lo que el estudio de sus características y comportamiento es fundamental. Los vehículos que se fabrican en la actualidad están destinados a muy distintos usos, por lo que sus características varían dentro de una amplia gama de formas, tamaños y pesos. (Bañón Blázquez & Beviá García, 2000)

(Cal & Mayor, 2007) Agrega que las normas que rigen el proyecto de calles y carreteras se fundamentan en gran parte en las dimensiones y características de operación de los vehículos que por ellas circulan, específicamente del vehículo de diseño, por ello, se hace necesario examinar todos los tipos de vehículos, establecer grupos y seleccionar el tamaño representativo (peso, dimensiones y características de operación) dentro de cada grupo para su uso en el proyecto.

2.2.3.2.1. Vehículo de diseño

El vehículo de diseño es aquel tipo de vehículo hipotético, cuyo peso, dimensiones y características de operación son utilizados para establecer los lineamientos que guiarán el proyecto geométrico de las carreteras, calles e intersecciones, tal que éstas puedan acomodar vehículos de este tipo. (Cal & Mayor, 2007)

Por ello, se hace necesario examinar todos los tipos de vehículos, establecer grupos y seleccionar el tamaño representativo (peso, dimensiones y características de operación) dentro de cada grupo para su uso en el proyecto.

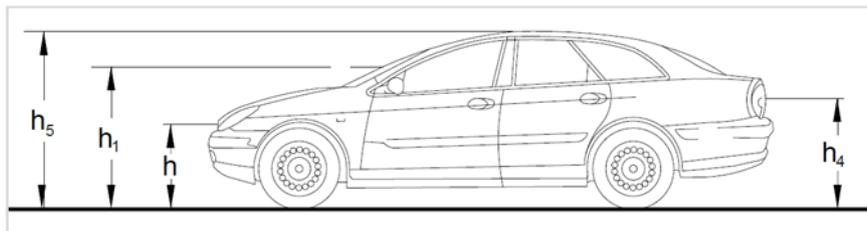
2.2.3.2.2. Vehículos ligeros

Conforme al (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2018) se consideran como vehículos ligeros aquellos correspondientes a los vehículos automotores con cuatro ruedas o menos diseñados para el transporte de pasajeros con ocho asientos o menos, sin contar el asiento del conductor

Para el cálculo de distancias de visibilidad de parada y de adelantamiento, se requiere definir diversas alturas, asociadas a los vehículos ligeros, que cubran las situaciones más favorables en cuanto a visibilidad. (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2018)

- h : altura de los faros delanteros: 0,60 m.
- h_1 : altura de los ojos del conductor: 1,07 m.
- h_2 : altura de un obstáculo fijo en la carretera: 0,15 m.
- h_4 : altura de las luces traseras de un automóvil o menor altura perceptible: 0,45 m.
- h_5 : altura del techo de un automóvil: 1,30 m

Figura 14: Vehículo ligero



Fuente: (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2018)

El vehículo ligero es el que más velocidad desarrolla y la altura del ojo de piloto es más baja, por tanto, estas características definirán las distancias de visibilidad de sobrepaso, parada, zona de seguridad en relación con la visibilidad en los cruces, altura mínima de barreras de seguridad y antideslumbrantes, dimensiones mínimas de plazas de aparcamiento en zonas de estacionamiento, miradores o áreas de descanso. (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2018)

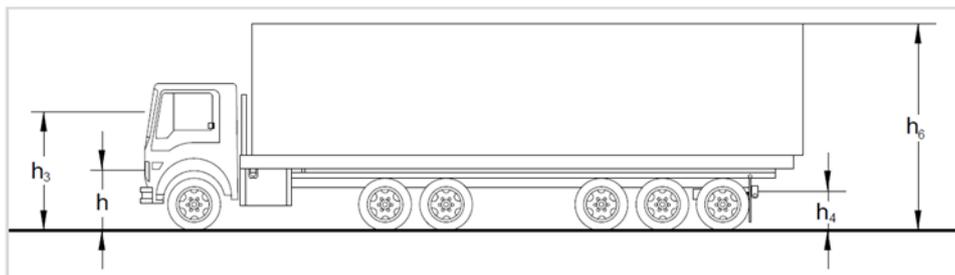
2.2.3.2.3. Vehículo pesado

Conforme al (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2018) serán considerados como vehículos pesados, los vehículos automotores de cuatro ruedas o más, diseñados para el transporte de pasajeros con más de ocho asientos, también se encuentran incluidos aquellos vehículos automotores, diseñados y construidos para el transporte de mercancías.

Para el cálculo de distancias de visibilidad de parada y de adelantamiento, se requiere definir diversas alturas, asociadas a los vehículos ligeros, que cubran las situaciones más favorables en cuanto a visibilidad. (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2018)

- h : altura de los faros delanteros: 0,60 m.
- h_3 : altura de ojos de un conductor de camión o bus, necesaria para la verificación de visibilidad en curvas verticales cóncavas bajo estructuras: 2,50 m.
- h_4 : altura de las luces traseras de un automóvil o menor altura perceptible de carrocería: 0,45 m.
- h_6 : altura del techo del vehículo pesado: 4,10 m

Figura 15: Vehículo pesado



Fuente: Manual de Carreteras-DG 2014, Ministerio de Transportes y Comunicaciones

El vehículo pesado tiene las características de sección y altura para determinar la sección de los carriles y su capacidad portante, radios y sobreanchos en curvas horizontales, alturas libres mínimas permisibles, necesidad de carriles adicionales, longitudes de incorporación, longitudes y proporción de aparcamientos para vehículos pesados en zonas de estacionamiento, miraderos o áreas de descanso. (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2018)

El (Transportation Research Board, 2010) clasifica a los vehículos pesados como camiones o vehículos recreativos (RVs). Los camiones cubren una amplia variedad de vehículos desde pequeñas camionetas y camiones con remolque con más de cuatro ruedas hasta doble y triple eje. La clasificación RVs incluye los camperos motorizados, y casas rodantes con remolques.



2.2.3.3. Camino.

Según (Cal & Mayor, 2007), se entiende por camino, aquella faja de terreno acondicionada para el tránsito de vehículos. La denominación de camino incluye a nivel rural las llamadas carreteras, y a nivel urbano las calles de la ciudad. Ciertamente uno de los patrimonios más valiosos con los que cuenta cualquier país, es la infraestructura de su red vial, por lo que su magnitud y calidad representan uno de los indicadores del grado de desarrollo de este mismo. Se encontrará siempre que un país de un alto nivel de vida tendrá un excelente sistema vial, un país atrasado tendrá una red deficiente.

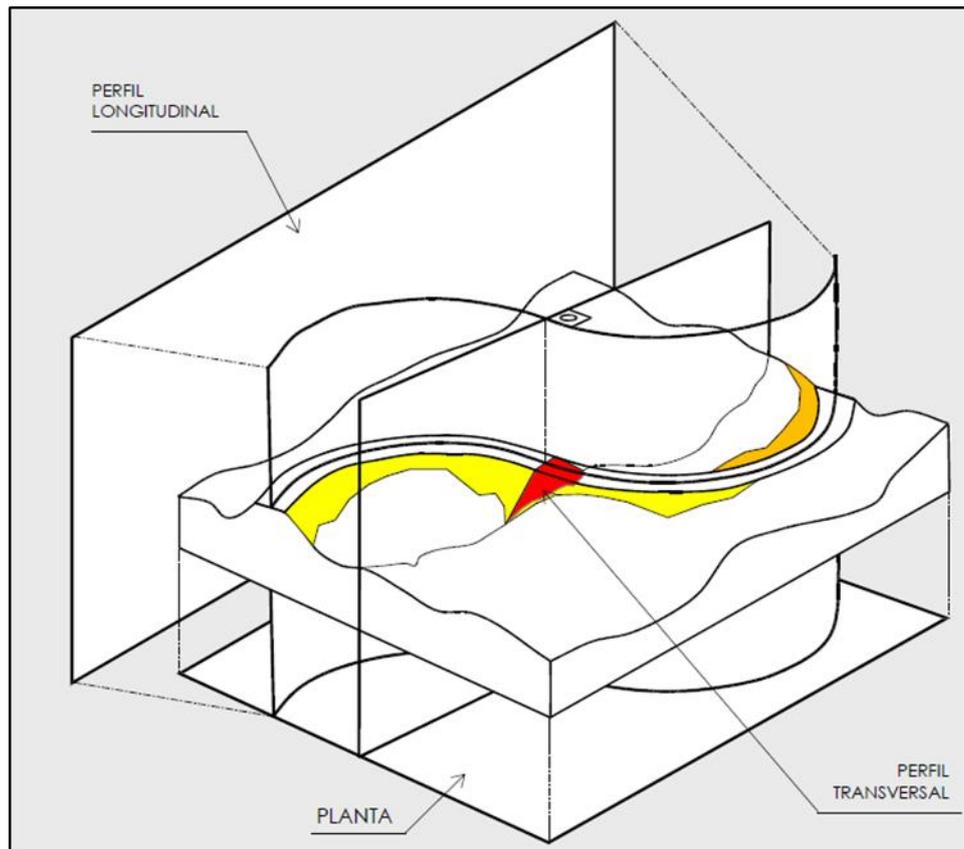
2.2.3.3.1. Diseño geométrico de una carretera

Según (Bañón Blázquez & Beviá García, 2000) Geométricamente, la carretera es un cuerpo tridimensional totalmente irregular, como se muestra en la Figura 16, lo que en un principio hace complicada su representación. Sin embargo, posee una serie de particularidades que simplifican y facilitan su estudio:

- El predominio de una de sus dimensiones respecto a las otras dos: la carretera es una obra lineal.
- La posibilidad de reproducirla fielmente mediante el desplazamiento de una sección transversal que permanece constante a lo largo de un eje que define su trayectoria.

Estas dos características permiten la adopción de un sistema de representación relativamente sencillo, de fácil interpretación y muy útil desde el punto de vista constructivo. En base a este sistema, la carretera queda totalmente definida mediante tres tipos de vistas: planta, perfil longitudinal y secciones transversales. (Bañón Blázquez & Beviá García, 2000)

Figura 16: Cuerpo tridimensional de una carretera



Fuente: (Bañón Blázquez & Beviá García, 2000)

2.2.3.3.1.1. Trazado en planta

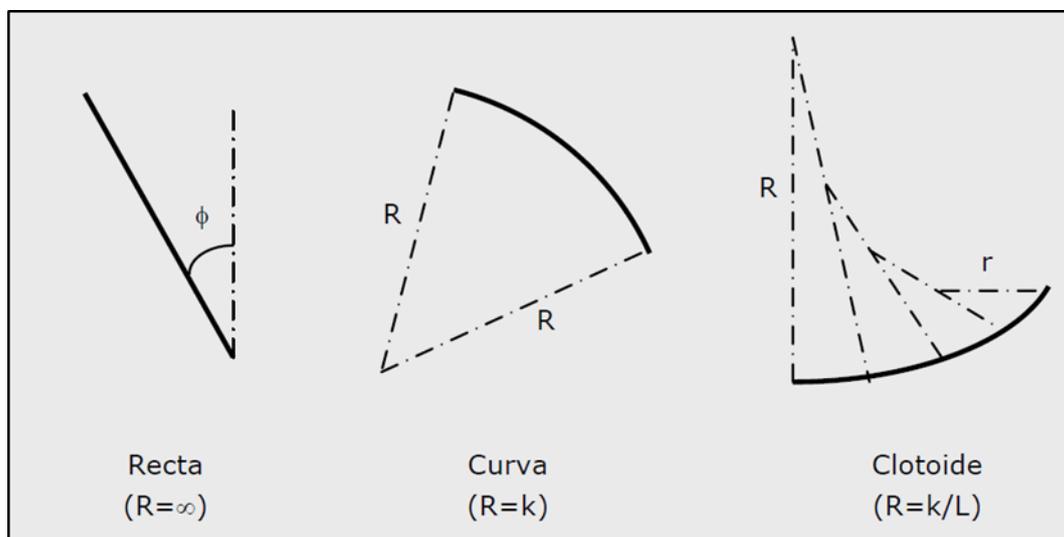
(Bañón Blázquez & Beviá García, 2000) Describe como la vista más importante de todas, ya que sobre ella se representa de forma explícita la proyección horizontal de la carretera. Se emplea para la confección de planos que recojan información de diversa índole, útil para la correcta definición de la vía: trazado, replanteo, geología, topografía, pluviometría, señalización, uso del suelo, etc. El trazado en planta suele ser el punto por el cual comienza a diseñarse geoméricamente una carretera, ya que al ser ésta una obra lineal, define perfectamente la forma y recorrido de la misma. El eje de un camino se halla compuesto de una serie de formas geométricas entrelazadas, denominadas genéricamente alineamientos. Éstas pueden ser de tres tipos:

- **Alineamientos rectos:** Este tipo de alineaciones son las que definen grosso modo el trazado de la carretera. Se caracterizan por su ausencia de curvatura, lo que posibilita que en estos tramos sea donde un vehículo pueda desarrollar su máxima velocidad.
- **Alineamientos de curvas circulares:** Están constituidas por curvas circulares, cuya principal misión es enlazar los tramos rectos, evitando quiebros bruscos en el trazado

del camino. Se caracterizan por una curvatura constante, lo que obliga al conductor a efectuar maniobras de giro. Para neutralizar la fuerza centrífuga que aparece en este tipo de tramos, se dota transversalmente a la vía de una inclinación hacia el interior, denominada peralte.

- **Alineamientos de curvatura variable:** La finalidad de este tipo de alineaciones es servir de enlace entre las dos anteriores. Su característica fundamental es la variación gradual de su curvatura a lo largo de su longitud, posibilitando de esta forma una transición suave entre alineaciones de distinta dirección y/o curvatura. De las distintas curvas de transición existentes, en carreteras se emplea la clotoide o espiral de Cornu.

Figura 17: Tipos de alineaciones en planta



Fuente: (Bañón Blázquez & Beviá García, 2000)

2.2.3.3.1.2. Trazado en perfil

Es la representación gráfica plana de la sección obtenida empleando como plano de corte el eje longitudinal de la carretera. En esta vista se sintetiza gran parte de la información necesaria para la construcción de la carretera, expresada tanto de forma gráfica como numérica. Al igual que el trazado en planta se componía de diversas alineaciones, el trazado en alzado de una vía lo conforman las rasantes, que definen la inclinación de la vía y dotan de cota a cada uno de sus puntos. (Bañón Blázquez & Beviá García, 2000)

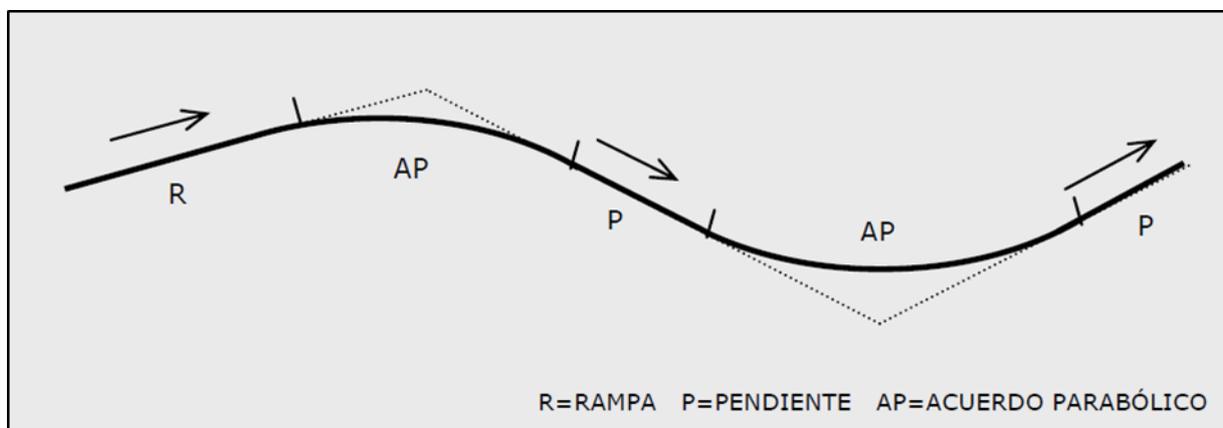
Pueden distinguirse los distintos tipos de elementos en alzado:

- **Ascensos:** Tramos que poseen una inclinación positiva en el sentido de la marcha de los vehículos. Dicho de otro modo, son aquellos tramos de vía que el vehículo recorre

cuesta arriba. En estas zonas se produce una reducción de la velocidad de los vehículos, especialmente grave en la categoría de los pesados.

- **Descensos:** Al contrario que los anteriores, son tramos de calzada de inclinación negativa en el sentido de la marcha. Este aspecto favorece un aumento de la velocidad de circulación de los vehículos.
- **Acuerdos:** Tramos de inclinación variable, empleados para efectuar una transición suave entre dos rasantes consecutivas. Generalmente suele emplearse la parábola como forma geométrica de acuerdo, por lo que se les da el nombre de acuerdos parabólicos.

Figura 18: Elemento de trazado en alzado



Fuente: (Bañón Blázquez & Beviá García, 2000)

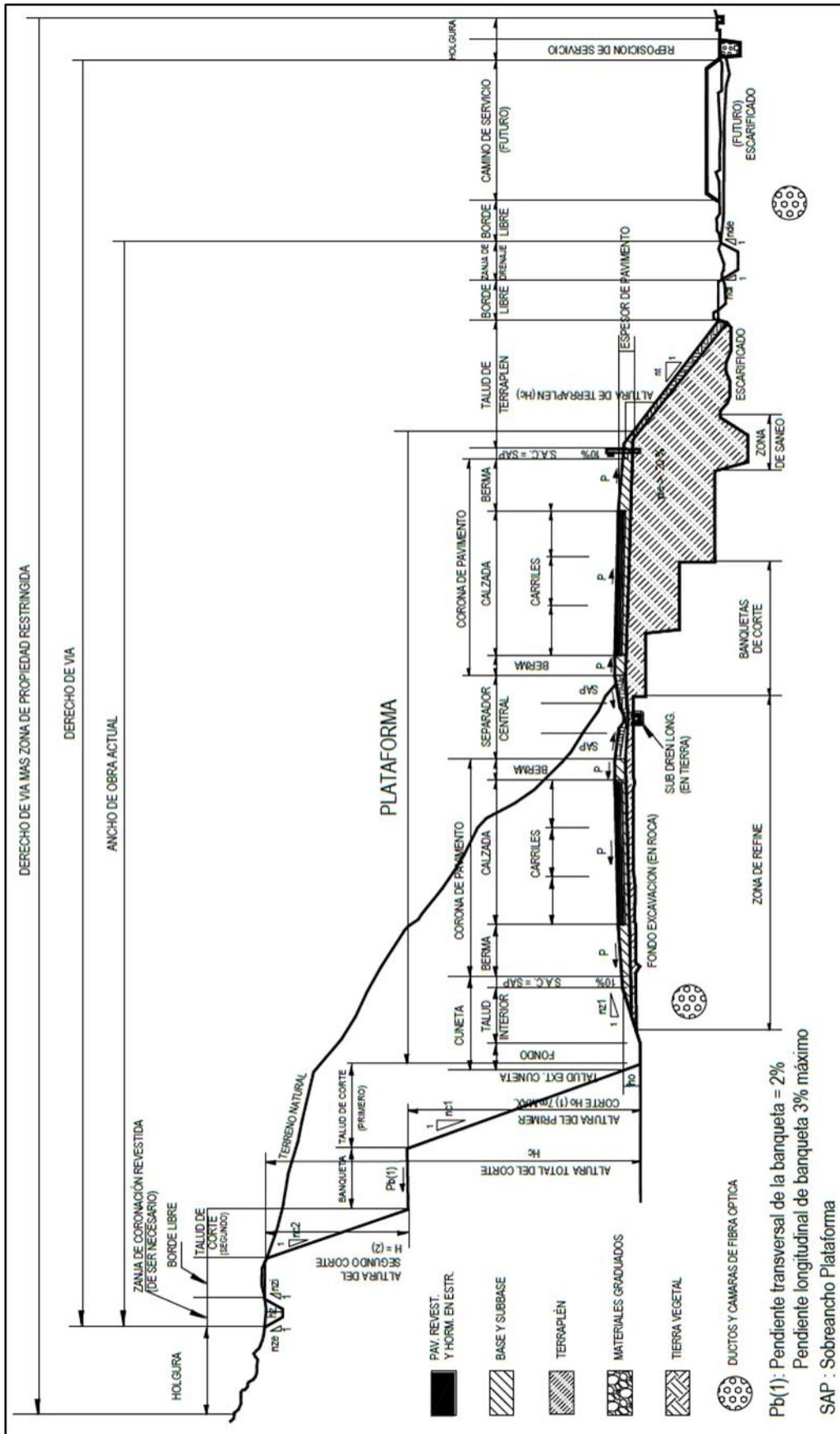
El trazado en perfil suele adaptarse generalmente a las exigencias topográficas del terreno por el que discurre la carretera, para de esta forma minimizar el movimiento de tierras, y además procurando mantener el equilibrio entre los volúmenes de desmonte y terraplén.

2.2.3.3.1.3. Sección transversal

(Bañón Blázquez & Beviá García, 2000) Indica que se obtiene seccionando la vía mediante un plano perpendicular al eje horizontal. La sección transversal de una carretera es la vista idónea para definir perfectamente los diferentes elementos que la componen: plataforma, calzada, carriles, bermas, mediana, cunetas, etc. Básicamente, la sección transversal proporciona información acerca de dos importantes aspectos de la vía: su anchura y su pendiente transversal.

En la **Figura 19** se muestra una sección transversal genérica con sus posibles componentes.

Figura 19: Sección transversal genérica



Fuente: (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2018)



2.2.3.3.2. Clasificación del camino de acuerdo con el tipo de terreno según el HCM 2010

2.2.3.3.2.1. Terreno General:

De acuerdo con el (Transportation Research Board, 2010) el concepto de terreno general se refiere a tramos prolongados de camino que contiene un número de pendiente en ascenso y descenso en la que ningún tramo es lo suficientemente largo o lo suficientemente empinado para tener un impacto significativo sobre la operación vehicular en general. Como pauta para este análisis el segmento puede aplicarse cuando no hay pendientes de 3% o más, en una longitud de más de 0.40 km (0.25 mi), o cuando no se excede entre el 2% y el 3% es una longitud larga de 0.81 km (0.50 mi).

Existen tres categorías de terreno general:

2.2.3.3.2.1.1. Terreno Plano

Cualquier combinación de pendiente horizontal o vertical que permite que los vehículos pesados mantengan la misma velocidad que los autos. Este tipo de terreno contiene típicamente pendientes cortas de no más de 2%. (Transportation Research Board, 2010)

2.2.3.3.2.1.2. Terreno Ondulado

Cualquier combinación de pendiente horizontal o vertical que hace que los vehículos pesados reduzcan sustancialmente su velocidad inferior a la de los autos, pero eso no hace que los vehículos pesados operen a velocidades lentas durante un lapso significativo de tiempo o por intervalos frecuentes. (Transportation Research Board, 2010)

2.2.3.3.2.1.3. Terreno Montañoso

Cualquier combinación de pendiente horizontal y alineación vertical que hace que los vehículos pesados funcionan a marcha lenta para distancias significativas o a intervalos frecuentes. El terreno montañoso es relativamente raro. (Transportation Research Board, 2010)

2.2.3.3.2.2. Terreno con pendientes específicas

Cualquier pendiente entre 2% y 3% y más de 0.81km (0.5 mi), o 3% o mayor y más de 0.40 km (0.25 mi), debe ser considerado como un segmento separado. El análisis de tales segmentos debe considerar las condiciones de actualización y la disminución de condiciones por separado, así como si la pendiente es una sola aislada o parte de una serie formando una pendiente compuesta. (Transportation Research Board, 2010)

2.2.3.3.3. Clasificación del camino de acuerdo con su función según el *HCM 2010*

El *Highway Capacity Manual* clasifica el camino en:

- Carreteras de dos carriles
- Carreteras Multicarril

2.2.3.3.3.1. Carreteras de dos carriles

2.2.3.3.3.1.1. Características y función de las carreteras de dos carriles

Las carreteras de dos carriles tienen un solo carril para el uso de tráfico en cada dirección. La característica principal que diferencia a este tipo de carretera de otras infraestructuras viales de flujo ininterrumpido es que las maniobras de paso tienen lugar en el carril opuesto de tráfico limitadas por la disponibilidad de algunos intervalos en el flujo de tráfico opuesto y por la disponibilidad de la suficiente distancia de visibilidad para que un conductor pueda discernir de forma segura la aproximación de un vehículo del tráfico opuesto, por lo tanto cuando la demanda del flujo vehicular y las restricciones geométricas aumentan, las oportunidades de paso disminuyen, creando pelotones dentro del flujo vehicular, generalmente ocasionado por vehículos pesados los cuales están sujetos a demora adicional por la incapacidad de adelantar al vehículo que va enfrente. (Transportation Research Board, 2010)

Las carreteras de dos carriles presentan una característica única: la calidad de operación disminuye precipitadamente a medida que aumenta la demanda de flujo y las operaciones de sobrepaso son "imposibles" a relativamente bajas relaciones de volumen - capacidad. Por esta razón, pocas carreteras de dos carriles operan a flujos vehiculares que se aproximan a la capacidad; en la mayoría de los casos, la mala calidad de operación ha llevado al mejoramiento o reconstrucción de la carretera antes de alcanzar la demanda de capacidad. (Transportation Research Board, 2010)

Estas carreteras son un elemento clave en los sistemas de transporte de la mayoría de los países. Se encuentran ubicadas en diferentes áreas geográficas y sirven a una amplia variedad de funciones de tráfico. Su principal función es la movilidad eficiente ya que conectan los principales generadores de viajes o sirven como enlaces primarios como por ejemplo la red nacional de carreteras. Estas rutas tienden a servir para distancias largas y viajes comerciales, así como de recreación, donde se espera que la operación sea a una constante alta velocidad y con pocas demoras por adelantamiento, aunque este no es su objetivo principal. (Transportation Research Board, 2010)

2.2.3.3.1.2. Clasificación de carreteras de dos carriles

Clase I de carreteras de dos carriles: Son carreteras donde los conductores esperan viajar a velocidades relativamente altas. Se clasifican como Clase I aquellas que son las principales rutas interurbanas, los conectores principales de los principales generadores de tráfico, rutas de cercanías diarias, o principales eslabones de redes estatales o carretera nacional. Estas sirven sobre todo para viajes de larga distancia, o facilitar las conexiones entre las vías que sirven a viajes de larga distancia. (Transportation Research Board, 2010)

Figura 20: Carreteras de dos carriles de Clase I



Fuente: (Transportation Research Board, 2010)

Clase II de carreteras de dos carriles: Son carreteras donde los conductores no necesariamente esperan viajar a altas velocidades. Funcionan como acceso a las carreteras clasificadas como Clase I, que actúan como rutas paisajísticas o recreativas (y no como arterias principales), o pasan a través de terrenos accidentados (donde las altas velocidades de operación serían imposibles) A menudo sirven a viajes relativamente cortos, el comienzo o fin de viajes más largos o viajes de turismo. (Transportation Research Board, 2010)

Figura 21: Carreteras de dos carriles de Clase II



Fuente: (Transportation Research Board, 2010)

Clase III de carreteras de dos carriles: Son carreteras que sirven para áreas moderadamente desarrolladas. Pueden ser tramos de carreteras de dos carriles Clase I o Clase II que pasan a través de las pequeñas ciudades o zonas recreativas desarrolladas. En tales segmentos, el tráfico local a menudo se mezcla con el tráfico de paso, y la densidad de los puntos de acceso no semaforizados son notablemente mayor que en una zona rural, también pueden ser segmentos de tramos más largos que pasan a través de áreas recreativas, Estos tramos son a menudo acompañados por límites de velocidad reducidos que reflejan el mayor nivel de actividad. (Transportation Research Board, 2010)

Figura 22: Carreteras de dos carriles de Clase III



Fuente: (Transportation Research Board, 2010)

La definición de las clases de carreteras de dos carriles se basa en su función. vías arterias o carreteras troncales se consideran de Clase I, mientras que la mayoría de las vías colectoras y locales se consideran Clase II o Clase III. La principal determinante de la clasificación de una carretera es la expectativa del conductor, que podría no estar de acuerdo con la categoría funcional global de la ruta. (Transportation Research Board, 2010)

2.2.3.3.1.3. Carriles de Adelantamiento

De acuerdo a la (Adaptación AASHTO, Justo, & Débora, 2011) En las secciones de inferior capacidad, para mejorar las operaciones de tránsito hasta por lo menos la misma calidad de servicio que los tramos adyacentes pueden añadirse carriles en uno o ambos sentidos de marcha. En los caminos de dos carriles, los carriles adicionales de adelantamiento a intervalos regulares pueden mejorar las operaciones globales del tránsito mediante la reducción de los retrasos causados por las escasas posibilidades de adelantamiento a lo largo de sustanciales longitudes, típicamente de 10 a 100 km.

2.2.3.3.2. Carreteras Multicarril

2.2.3.3.2.1. Características y clasificación de carreteras multicarril.

De acuerdo con el (Transportation Research Board, 2010) las carreteras multicarril generalmente tienen de cuatro a seis carriles (en ambas direcciones) y límites de velocidad entre 64 a 89 km/h (40 a 55 mi/h). Estas carreteras se dividen por el tipo de mediana, pueden estar no divididos (con sólo una línea central que separa las direcciones de flujo), o puede tener uno o dos carriles de giro a izquierda (*TWLTL*, *Two-way left turn lane*). Por lo general se encuentran en áreas suburbanas, que llevan a las grandes ciudades o a lo largo de los corredores rurales de alto volumen, conectando dos ciudades o dos centros que generan un importante número de viajes.

Figura 23: Vía urbana multicarril dividida, y sin división.



Fuente: (Transportation Research Board, 2010)

Figura 24: Autopista urbana multicarril y autopista rural multicarril



Fuente: (Transportation Research Board, 2010)



2.2.3.4. Dispositivos para el control de tránsito

Se denominan dispositivos para el control del tránsito a las señales, marcas, semáforos y cualquier otro dispositivo, que se colocan sobre o adyacente a las calles y carreteras por una autoridad, para prevenir, regular y guiar a los usuarios de las mismas. Los dispositivos de control indican a los usuarios las precauciones (prevenciones) que deben tener en cuenta, las limitaciones (restricciones) que gobiernan el tramo en circulación y las informaciones (guías) estrictamente necesarias, dadas las condiciones específicas de la calle o carretera. (Cal & Mayor, 2007)

2.2.3.4.1. Señales verticales

De acuerdo con el (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2016) las señales verticales son dispositivos instalados al costado o sobre el camino, y tienen por finalidad, reglamentar el tránsito, prevenir e informar a los usuarios mediante palabras o símbolos establecidos en el Manual de Dispositivos de Control del Tránsito Automotor para Calles y Carreteras. Siendo la función de las señales verticales, la de reglamentar, prevenir e informar al usuario de la vía, su utilización es fundamental principalmente en lugares donde existen regulaciones especiales, permanentes o temporales, y en aquellos donde los peligros no siempre son evidentes.

2.2.3.4.2. Marcas en el pavimento

Las Marcas en el Pavimento o Demarcaciones, constituyen la señalización horizontal y está conformada por marcas planas en el pavimento, tales como líneas horizontales y transversales, flechas, símbolos y letras, que se aplican o adhieren sobre el pavimento, sardineles, otras estructuras de la vía y zonas adyacentes. Forma parte de esta señalización, los dispositivos elevados que se colocan sobre la superficie de rodadura, también denominadas marcas elevadas en el pavimento, con el fin de regular, canalizar el tránsito o indicar restricciones. . (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2016)

La Marcas en el Pavimento, también tienen por finalidad complementar los dispositivos de control del tránsito, tales como las señales verticales, semáforos y otros, puesto que tiene la función de transmitir instrucciones y mensajes que otro tipo de dispositivo no lo puede hacer de forma efectiva. Se emplean para regular o reglamentar la circulación, advertir y guiar a los usuarios de la vía, por lo que constituyen un elemento indispensable para la operación vehicular y seguridad vial. (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2016)

2.2.4. Corrientes de tránsito

Las corrientes de Tránsito están compuestas de conductores individuales, vehículos que interactúan entre ellos, con los elementos físicos del camino y su ambiente en general, debido a que el comportamiento de los conductores y las características de los vehículos varían, el comportamiento individual de los vehículos dentro de la corriente de Tránsito no será exactamente la misma. Además, dos corrientes de Tránsito no se comportarán en el mismo modo, incluso en circunstancias similares, debido a que el comportamiento de los conductores varía de acuerdo a las características locales y los hábitos de conducción. Afortunadamente, aunque las características exactas varían, existe un rango razonable y consistente entre el comportamiento de los conductores, por lo tanto, el de las corrientes de tránsito. . (Roess, Prassas, & McShane, 2011)

Al describir las corrientes de tránsito en términos cuantitativos, el propósito es tanto entender la variabilidad inherente de sus características, así como definir rangos normales de comportamiento. Para hacer esto los parámetros clave deben ser definidos y medibles. (Roess, Prassas, & McShane, 2011)

2.2.4.1. Condiciones de operación

(Roess, Prassas, & McShane, 2011) separa las corrientes de tránsito en dos principales categorías:

- Circulación Continua
- Circulación Discontinua

2.2.4.1.1. Circulación continua

(Roess, Prassas, & McShane, 2011) indica que las infraestructuras para circulación continua no tienen elementos fijos externos al flujo de tráfico, tales como semáforos, que produzcan interrupciones en el mismo. Las condiciones de la circulación son el resultado de las interacciones entre los vehículos, y las características geométricas y ambientales de la vía.

A pesar de que una circulación continua pura solo existe en autopistas, también pueden existir en secciones de carreteras frecuentemente en áreas rurales, donde existen largas distancias entre interrupciones fijas, así como pueden existir en algunas secciones de carreteras de dos carriles y carreteras multicarril. Como regla general, se considera que se opera a circulación continua cuando la distancia entre dos señales de tránsito u otra interrupción fija significativa sea más de 3.22 km (2 mi) (Roess, Prassas, & McShane, 2011)



2.2.4.1.2. Circulación discontinua

Las infraestructuras viales concebidas para la circulación discontinua tienen elementos fijos que producen interrupciones periódicas en la circulación vial. Los semáforos, señales de pare, y otros tipos de regulación son algunos de estos elementos. Estos equipos obligan a parar (o al menos a reducir la velocidad significativamente) a los vehículos, independientemente de la cantidad de tráfico existente. (Roess, Prassas, & McShane, 2011)

Los términos circulación continua y discontinua se refieren a un tipo de infraestructura y no a la calidad de la circulación en un momento dado. Por lo tanto, aunque una autopista se encuentre sobresaturada continua seguirá siendo una “infraestructura para circulación continua”, puesto que la razón de la congestión es interna al flujo vehicular. (Roess, Prassas, & McShane, 2011)

El análisis de estos tipos de estructura varía considerablemente. El análisis de las estructuras para circulación discontinua debe tener en cuenta el impacto de las interrupciones periódicas. Por ejemplo, un semáforo limita la fracción de tiempo útil a cada movimiento existente en la intersección. La capacidad queda limitada no sólo por el espacio físico disponible, sino también por el tiempo útil disponible a los distintos movimientos del flujo viario. Las estructuras para circulación continua no tienen interrupciones prefijadas, y por lo tanto no tienen limitaciones temporales al uso del espacio vial. (Roess, Prassas, & McShane, 2011)

2.2.4.2. Parámetros de las corrientes de tránsito.

De acuerdo con (Roess, Prassas, & McShane, 2011) Los parámetros de las corrientes de tránsito se dividen en dos grandes categorías, los parámetros macroscópicos que describen a las corrientes de tránsito como un todo, y los parámetros microscópicos que describen el comportamiento individual de los vehículos dentro de la corriente de tránsito.

Los tres parámetros macroscópicos principales son:

- Volumen de tránsito y Tasa de Flujo
- Velocidad
- Densidad

Los parámetros microscópicos son:

- Velocidad individual de cada vehículo
- Intervalo
- Espaciamientos



2.2.4.2.1. Volumen de tránsito y tasa de flujo

2.2.4.2.1.1. Volumen:

(Cal & Mayor, 2007) Define el volumen de tránsito, como el número de vehículos que pasan por un punto o sección transversal dados, de un carril o de una calzada, durante un periodo determinado de tiempo. La unidad de medida para los vehículos es simplemente “Vehículos”, aunque a menudo se exprese en “vehículos por unidad de tiempo”. Se expresa como:

$$Q = \frac{N}{T} \quad \text{Ecuación 1}$$

Dónde: Q =vehículos que pasan por unidad de tiempo (vehículos/periodo)

N = número total de vehículos que pasan (vehículos)

T = periodo determinado (unidades de tiempo)

2.2.4.2.1.2. Volumen horario de máxima demanda

(Cal & Mayor, 2007) Define como el máximo número de vehículos que pasan por un punto o sección de un carril de una calzada durante 60 minutos consecutivos. Es el representativo de los periodos de máxima demanda que se pueden presentar durante un día en particular.

2.2.4.2.1.3. Tasa de flujo

El (Transportation Research Board, 2010) define como la tasa horaria equivalente al número de vehículos que pasan por un perfil dado o sección de un carril o carretera durante un intervalo dado de tiempo inferior a la hora, que normalmente es de 15 minutos. Existe una distinción entre volumen y la tasa de flujo, el volumen es el número de vehículos observado o que se predice que pasen a través de un punto durante un intervalo de tiempo, mientras que la tasa de flujo represente el número de vehículos que pasan un punto durante un intervalo de tiempo menor a 1h, pero expresado en unidades horarias. Por ejemplo, un volumen de 100 veh observado en un periodo de 15 minutos implica una tasa de flujo de 100 veh dividido por 0.25h, o 400 veh/h. (Transportation Research Board, 2010)

El volumen y la tasa de flujo son variables que ayudan a cuantificar la demanda, es decir, el número de vehículos que desean usar un sistema vial durante un periodo específico de tiempo, típicamente 1h o 15min. El (Transportation Research Board, 2010)

2.2.4.2.1.4. Características de los volúmenes de tránsito

Los volúmenes de tránsito siempre deben ser considerados como dinámicos, por lo que solamente son precisos para el periodo de duración de los aforos. Sin embargo, debido a que sus variaciones son generalmente rítmicas y repetitivas, es importante tener un conocimiento de sus características, para así programar aforos, relacionar volúmenes en un tiempo y lugar con volúmenes de otro tiempo y lugar, y prever con la debida anticipación la actuación de las fuerzas dedicadas al control del tránsito y labor preventiva, así como las de conservación. (Cal & Mayor, 2007)

Por lo tanto, es fundamental, en la planeación y operación de la circulación vehicular, conocer las variaciones periódicas de los volúmenes de tránsito dentro de las horas de máxima demanda, en las horas del día, en los días de la semana y en los meses del año. Aún más, también es importante conocer las variaciones de los volúmenes de tránsito en función de la distribución por carriles, su distribución direccional y su composición. (Cal & Mayor, 2007)

2.2.4.2.1.5. Factor de Hora Punta

De acuerdo a (Roess, Prassas, & McShane, 2011) Un volumen horario de máxima demanda no siempre implica que el flujo sea constante durante toda la hora. Esto significa que existen periodos cortos dentro de la hora con tasas de flujo, mucho mayores a las de la hora misma. Se llama factor de la hora de máxima demanda, PHF a la relación entre el volumen horario de máxima demanda, VHMD, y el flujo máximo, $q_{máx}$, que se presenta durante un periodo dado dentro de dicha hora. Matemáticamente se expresa como:

$$PHF = \frac{VHMD}{N(q_{máx})} \quad \text{Ecuación 2}$$

Dónde: N= número de periodos durante la hora de máxima demanda.

Los periodos dentro de la hora de máxima demanda pueden ser de 5, 10 ó 15 minutos, utilizándose este último con mayor frecuencia, en cuyo caso N será igual a 4

El (Transportation Research Board, 2010) añade, si la máxima tasa de flujo en un periodo de 15 minutos ha sido directamente medida en campo, entonces el PHF será igual a 1.

2.2.4.2.2. Velocidad

El (Transportation Research Board, 2010) define la velocidad como una tasa de movimiento expresada como distancia en la unidad de tiempo, generalmente en kilómetros por hora (km/h) o millas por hora (mi/h).

$$v = \frac{d}{t} \quad \text{Ecuación 3}$$

Dónde: v = velocidad (mi/h, km/h)

d = distancia recorrida (mi o km)

t = tiempo en recorrer una distancia d (h o s)

Para caracterizar la velocidad de una corriente o flujo de tráfico, debe utilizarse un valor representativo, pues existe en general una amplia distribución de las velocidades individuales observadas en ese flujo. Varios parámetros de velocidad pueden ser aplicados a una corriente de tránsito. Algunos de ellos son:

- **Velocidad Media de Recorrido:** Es la medida basada en el tiempo de recorrido observado en una longitud conocida de una autopista. Se calcula tomando la longitud de segmento de la vía y dividiéndola entre el promedio del tiempo de recorrido de los vehículos que atraviesan este segmento, incluyendo todos los tiempos de demora por paradas.
- **Velocidad Media Espacial:** Es un término estadístico que indica el promedio de la velocidad basado en el promedio del tiempo de recorrido de los vehículos que cruzan una longitud de una vía. Es denominado así porque el tiempo de recorrido promedio pondera el promedio por el tiempo que cada vehículo gaste en un segmento definido de vía o espacio.
- **Velocidad Media Temporal:** Es el promedio aritmético de las velocidades de los vehículos observados pasando un punto en una vía. Las velocidades individuales de los vehículos son agrupados y promediados aritméticamente.
- **Velocidad en Flujo Libre:** Es El promedio de la velocidad de los vehículos en un segmento de vía medido bajo condiciones de bajo volumen, cuando los conductores son libres conducir a una velocidad deseada y no están restringidos por la presencia de otros vehículos o dispositivos de control de tránsito.



- **Velocidad Media de Marcha:** Es la longitud de un tramo de carreteras dividido por el promedio de la velocidad de marcha de los vehículos que atraviesan este segmento. La velocidad de marcha incluye solo el tiempo en el cual los vehículos estuvieron en movimiento.

2.2.4.3. Distancia de visibilidad

Un parámetro correlacionado a la velocidad y al tiempo de percepción son las distancias de visibilidad. De acuerdo al (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2018) Es la longitud continua hacia adelante de la carretera, que es visible al conductor del vehículo para poder ejecutar con seguridad las diversas maniobras a que se vea obligado o que decida efectuar. En los proyectos se consideran tres distancias de visibilidad:

- Visibilidad de parada.
- Visibilidad de paso o adelantamiento.
- Visibilidad de cruce con otra vía.

2.2.4.3.1.1. Distancia de paso o adelantamiento

El (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2018) Define como la mínima distancia que debe estar disponible, a fin de facultar al conductor del vehículo a sobrepasar a otro que viaja a una velocidad menor, con comodidad y seguridad, sin causar alteración en la velocidad de un tercer vehículo que viaja en sentido contrario y que se hace visible cuando se ha iniciado la maniobra de sobrepaso.

Dichas condiciones de comodidad y seguridad se dan cuando la diferencia de velocidad entre los vehículos que se desplazan en el mismo sentido es de 15 km/h y el vehículo que viaja en sentido contrario transita a la velocidad de diseño. La distancia de visibilidad de adelantamiento debe considerarse únicamente para las carreteras de dos carriles con tránsito en las dos direcciones, dónde el adelantamiento se realiza en el carril del sentido opuesto. En la siguiente tabla se presentan distancias mínimas de visibilidad de adelantamiento para carreteras de dos carriles de acuerdo con las normas peruanas. (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2018)

Tabla 1: Mínima distancia de visibilidad de adelantamiento para carreteras de dos carriles

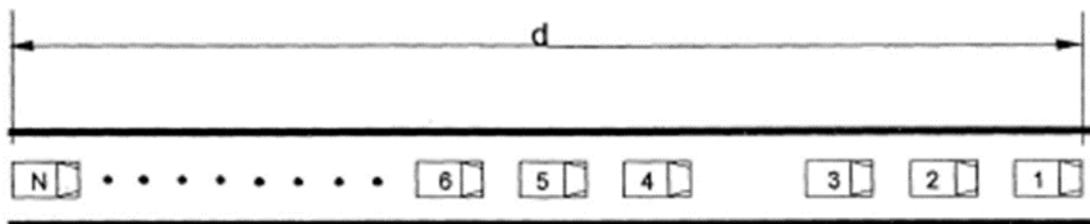
Velocidad específica en la tangente en la que se efectúa la maniobra (km/h)	Velocidad del vehículo adelantado (km/h)	Velocidad del vehículo que adelanta, V (km/h)	Mínima distancia de visibilidad de adelantamiento (m)	
			Calculada	Redondeada
20	-	-	130	130
30	29	44	200	200
40	36	51	266	270
50	44	59	341	345
60	51	66	407	410
70	59	74	482	485
80	65	80	538	540
90	73	88	613	615
100	79	94	670	670
110	85	100	727	730
120	90	105	774	775
130	94	109	812	815

Fuente: (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2018)

2.2.4.3.2. Densidad

(Cal & Mayor, 2007) Definen la densidad como el número de vehículos que ocupan un tramo de longitud dado de un carril o carretera en un instante en particular, promediado entre esta longitud, en unidades generalmente de vehículos por kilómetro (v/km), es un parámetro crítico en la descripción de las operaciones de tráfico. Describe la proximidad entre los vehículos, y refleja la libertad de maniobra dentro de la corriente de tráfico.

Figura 25: Densidad o concentración



Fuente: (Cal & Mayor, 2007)

Es difícil medir directamente la densidad en el campo, pues es necesario contar con un punto elevado desde el que se puedan fotografiar, video- filmar, o divisar tramos de vía de longitud significativa.

2.2.5. Capacidad y nivel de servicio

2.2.5.1. Capacidad de la vía

Según él (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2018) se define como el número máximo de vehículos por unidad de tiempo, que pueden pasar por una sección de la vía, bajo las condiciones prevalecientes del tránsito. Normalmente, se expresa como un volumen horario, cuyo valor no debe sobrepasarse a no ser que las condiciones prevalecientes cambien.

De acuerdo con él (Transportation Research Board, 2010), las condiciones prevalecientes geométricas, de tránsito y de control definen la capacidad, las cuales deben ser razonablemente uniformes para cualquier segmento de una infraestructura vial.

2.2.5.1.1. Capacidad de una carretera de dos carriles

De acuerdo con el (Transportation Research Board, 2010) la capacidad de una carretera de dos carriles en condiciones básicas es 1700 vl/h en una dirección, con un límite de 3.200 vl/h para el total de las dos direcciones. Debido a las interacciones entre los flujos direccionales, cuando se alcanza una capacidad de 1700 vl/h en una dirección, el flujo máximo contrario sería limitado a 1500 vl/h

2.2.5.1.2. Capacidad de segmentos Multicarril

La capacidad de un segmento de vía multicarril bajo condiciones de base varía con la velocidad a flujo libre como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 2: Capacidad en carreteras multicarril

Velocidad a Flujo Libre (FFS)		Capacidad
mi/h	km/h	vl/h/c
60	97	2200
55	89	2100
50	80	2000
45	72	1900

Fuente: (Transportation Research Board, 2010)

Estos valores representan las normas nacionales. La capacidad varía estocásticamente, y un lugar determinado podría tener un valor mayor o menor. Por lo anterior, la capacidad se refiere a la velocidad de flujo promedio a través de todos los carriles. Así, una vía multicarril con dos carriles en una dirección con 60 km/h de FFS tendría una capacidad esperada 4,400 pc / h. Este flujo no se distribuye uniformemente en los dos carriles. Por lo tanto, un carril podría tener flujos estables superiores que sobrepasen de 2200 vl/h/c. (Transportation Research Board, 2010)



2.2.5.2. Condiciones base o condiciones ideales

Los procedimientos para determinar la capacidad provienen de fórmulas, tabulaciones o gráficos, que han sido diseñados para condiciones estándar, las cuales deben ser ajustadas para tener en cuenta las condiciones reales que no coinciden, estas condiciones estándar se denominan condiciones base. (Transportation Research Board, 2010)

Las condiciones ideales en las cuales se logra la máxima capacidad incluyen: el buen tiempo, buena visibilidad, ningún incidente o accidentes, ninguna zona de trabajo, y no hay defectos en el pavimento que afectarían las operaciones, así como el flujo vehicular solo está compuesto por vehículos ligeros y son conductores familiarizados con la carretera. (Transportation Research Board, 2010)

Para carreteras de dos carriles, se ha demostrado que los carriles más estrechos que 3.65m y bermas más estrechas que 1.80m reducen la velocidad, y que también pueden aumentar el Porcentaje de tiempo usado viajando en colas (PTSF), así como la presencia de zonas de no rebase. (Transportation Research Board, 2010)

En carreteras multicarril las características tales como el ancho del carril, un espacio lateral total (TLC), tipo de mediana y la densidad de punto de acceso tendrá un impacto en la velocidad a flujo libre (FFS) de la instalación. (Transportation Research Board, 2010)

2.2.5.3. Nivel de servicio

Para medir la calidad del flujo vehicular se usa el concepto de nivel de servicio. Es una medida cualitativa que describe las condiciones de operación de un flujo vehicular, y de su percepción por los motoristas y/o pasajeros. Estas condiciones se describen en términos de factores tales como la velocidad y el tiempo de recorrido, la libertad de maniobras, la comodidad, la conveniencia y la seguridad vial (Cal & Mayor, 2007)

El (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2018) de acuerdo a La metodología desarrollada por el TRB define cuatro Niveles de Servicio (A, B, C y D). Cuando la carretera opera a capacidad se habla de Nivel E y cuando se tiene flujo forzado se le denomina Nivel F.

- **Nivel A:** Corresponde a las condiciones de libre flujo vehicular. Las maniobras de conducción no son afectadas por la presencia de otros vehículos y están condicionadas únicamente por las características geométricas de la carretera y las decisiones del conductor. Este nivel de servicio ofrece comodidad física y psicológica al conductor.



Las interrupciones menores para circular son fácilmente amortiguadas sin que exijan un cambio en la velocidad de circulación.

- **Nivel B:** Indica condiciones buenas de libre circulación, aunque la presencia de vehículos que van a menor velocidad puede influir en los que se desplazan más rápido. Las velocidades promedio de viaje son las mismas que en el nivel A, pero los conductores tienen menor libertad de maniobra. Las interrupciones menores son todavía fácilmente absorbibles, aunque los deterioros locales del nivel de servicio pueden ser mayores que en el nivel anterior.
- **Nivel C:** En este nivel, la influencia de la densidad de tráfico en la circulación vehicular determina un ajuste de la velocidad. La capacidad de maniobra y las posibilidades de adelantamiento se ven reducidas por la presencia de grupos de vehículos. En las carreteras de varios carriles con velocidades de circulación mayores a 80 Km/h, se reducirá el libre flujo sin llegar a la detención total. Las interrupciones menores pueden causar deterioro local en el nivel de servicio y se formarán colas de vehículos ante cualquier interrupción significativa del tráfico.
- **Nivel D:** La capacidad de maniobra se ve severamente restringida, debido a la congestión del tránsito que puede llegar a la detención. La velocidad de viaje se reduce por el incremento de la densidad vehicular, formándose colas que impiden el adelantamiento a otros vehículos. Solo las interrupciones menores pueden ser absorbibles, sin formación de colas y deterioro del servicio.
- **Nivel E:** La intensidad de la circulación vehicular se encuentra cercana a la capacidad de la carretera. Los vehículos son operados con un mínimo de espacio entre ellos, manteniendo una velocidad de circulación uniforme. Las interrupciones no pueden ser disipadas de inmediato y frecuentemente causan colas, que ocasionan que el nivel de servicio se deteriore hasta llegar al nivel F. Para el caso de las carreteras de varios carriles con velocidad de flujo libre entre 70 y 100 km/h, los vehículos desarrollan velocidades menores, que son variables e impredecibles.
- **Nivel F:** En este nivel, el flujo se presenta forzado y de alta congestión, lo que ocurre cuando la intensidad del flujo vehicular (demanda) llega a ser mayor que la capacidad de la carretera. Bajo estas condiciones, se forman colas en las que se experimenta periodos cortos de movimientos seguidos de paradas. Debe notarse que el nivel F se emplea para caracterizar tanto el punto de colapso, como las condiciones de operación dentro de la cola vehicular.

Figura 26: Nivel de servicio A y B



Fuente: (Transportation Research Board, 2010)

Figura 27: Nivel de servicio C y D



Fuente: (Transportation Research Board, 2010)

Figura 28: Nivel de servicio E y F



Fuente: (Transportation Research Board, 2010)

2.2.5.4. Medidas de eficacia

Para cada tipo de vía, los niveles de servicio se determinan en función de uno o varios parámetros que son los que mejor describen la calidad operativa del tipo de vía en estudio. Si bien el concepto de nivel de servicio intenta abarcar un gran abanico de condiciones de

funcionamiento, las limitaciones en la toma de datos y en su disponibilidad hacen poco práctico el tratamiento de todos los parámetros operativos en todos los tipos de vía. Los parámetros seleccionados para definir los niveles de servicio en cada tipo de vía se denominan “medidas de eficacia”, y representan las medidas disponibles que mejor describen la calidad de funcionamiento del tipo de estructura o vía en estudio. (Transportation Research Board, 2010)

Tabla 3: Medidas de eficacia para la definición de nivel de servicio

TIPO DE VÍA	MEDIDA DE EFICACIA
Autopistas	
Segmentos básicos de autopista	Densidad (vl/km/c)
Tramo de trenzado	Velocidad media de recorrido (km/h)
Intersecciones de ramales	Intensidades (vl/h)
Carreteras multicarril	Densidad (vl/km/c)
Carreteras de dos carriles	Demora porcentual (%)
	Velocidad Media de recorrido (km/h)
Intersecciones semaforizadas	Demora media individual en parada (sg/vl)
Intersecciones no semaforizadas	Capacidad en reserva (vl/h)
Arterias	Velocidad media de recorrido (km/h)
Transporte colectivo	Factor de carga (pers/asiento)
Peatones	Espacio (m ² /pt)

Fuente: (Transportation Research Board, 2010)

2.2.5.4.1. Medidas de eficacia en Carreteras de dos carriles

El (Transportation Research Board, 2010) describe que debido a la gran cantidad de situaciones en las que las carreteras de dos carriles se pueden encontrar, se incorporan en la metodología del HCM 2010, tres medidas de la eficacia para determinar niveles de servicio para automóviles.

1. Velocidad promedio de viaje (*Average Travel Speed, ATS*): Refleja la movilidad en una carretera de dos carriles. Se define como la longitud del tramo de carretera dividido por el promedio del tiempo de viaje que tomar recorrer este segmento.
2. Porcentaje de tiempo usado viajando en colas (*Percent Time Spent Following, PTSF*): Representa la libertad de maniobra, el confort y la conveniencia del viaje. Es el promedio del porcentaje de tiempo que los vehículos deben viajar en colas detrás de los vehículos más lentos debido a la incapacidad de adelantar. Debido a que esta característica es difícil de medir en el campo, una medida sustitutiva es el porcentaje de vehículos que circulen a menos de 3,0 segundos en un lugar representativo en el segmento de la carretera, este parámetro también representa el porcentaje aproximado de los vehículos que viajan en colas.



3. Porcentaje de la velocidad a flujo libre (*Percent of Free Flow Speed* , PFFS) representa la capacidad de los vehículos para viajar cerca o en el límite de velocidad.

En carreteras Clase I de dos carriles, la velocidad y la demora por restricciones de paso son importantes para los conductores. Por lo tanto, en estas carreteras, el nivel de servicio se define en términos de ATS y PTSF. En carreteras Clase II, la velocidad de desplazamiento no es un tema importante para los conductores. Por lo tanto, en estas carreteras, el nivel de servicio se define únicamente en términos de PTSF. En carreteras Clase III, no se espera altas velocidades. Debido a que la longitud de tramos es generalmente corta, las restricciones de paso tampoco son una preocupación importante. En estos casos, a los conductores les gustaría desplazarse a velocidad constante o cerca del límite de velocidad. Por lo tanto, en estas carreteras, se utiliza el porcentaje de velocidad a flujo libre (PFFS) para definir los niveles de servicio (Transportation Research Board, 2010)

Además (Transportation Research Board, 2010) agrega que debido a que las expectativas de los conductores y las características de las tres categorías de carreteras de dos carriles son muy diferentes, es difícil proporcionar una única definición de las condiciones de operación en cada nivel de servicio. Sin embargo, dos características tienen un impacto significativo en las operaciones reales y las percepciones del servicio del conductor:

- Capacidad de adelantamiento: Debido a que las maniobras de paso en carreteras de dos carriles se desarrollan en el carril de la dirección opuesta de flujo, la posibilidad de paso se limita al porcentaje del flujo opuesto y a la distribución de brechas en el flujo opuesto.
- Demanda de adelantamiento: Así como la formación de pelotones y el incremento de demoras por adelantamiento (PTSF) aumenta en una dirección dada, la demanda de maniobras de adelantamiento aumenta. Así como aumenta el número de conductores en un pelotón detrás de un vehículo lento, ellos desearán realizar más maniobras de adelantamiento.

Ambas la capacidad de adelantamiento y la demanda de paso se relacionan con los porcentajes de flujo. Si el flujo en ambas direcciones aumenta, se establece una tendencia difícil: Así como la demanda de adelantamiento aumenta, la capacidad de adelantamiento disminuye (Transportation Research Board, 2010)

2.2.6. Transito futuro

De acuerdo con (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2018) Una carretera debe estar diseñada para soportar el volumen de tráfico que es probable que ocurra en la vida útil del proyecto. No obstante, el establecimiento de la vida útil de una carretera requiere la evaluación de las variaciones de los principales parámetros en cada segmento de la misma, cuyo análisis reviste cierta complejidad por la obsolescencia de la propia infraestructura o inesperados cambios en el uso de la tierra, con las consiguientes modificaciones en los volúmenes de tráfico, patrones, y demandas.

La definición geométrica de las nuevas carreteras, o en el caso de mejoras en las ya existentes, no debe basarse únicamente en el volumen de tránsito actual, sino que debe considerar, el volumen previsto que va a utilizar esta instalación en el futuro. De esta forma, deberán establecerse los volúmenes de tránsito presentes en el año de puesta en servicio del proyecto y aquellos correspondientes al año horizonte de diseño. Ello, además de fijar algunas características del proyecto, permite eventualmente, elaborar un programa de construcción por etapas. (Transportation Research Board, 2010)

A continuación, se establece la metodología para el estudio de la demanda de tránsito:

$$P_f = P_o(1 + T_c)^n \quad \text{Ecuación 4}$$

Dónde: P_f = Tránsito Futuro (veh/h)

P_o = Tránsito inicial (veh/h)

T_c = Tasa de crecimiento anual por tipo de vehículo

n = Año a estimar

La proyección debe también dividirse en dos partes. Una proyección para vehículos ligeros que crecerá aproximadamente al ritmo de la tasa de crecimiento de la población y una proyección de vehículos pesados que crecerá aproximadamente con la tasa de crecimiento de la economía. Ambos índices de crecimiento correspondientes a la región que normalmente cuenta con datos estadísticos de estas tendencias. (Transportation Research Board, 2010)

2.2.6.1. Tasa de crecimiento de la población

De acuerdo al censo nacional realizado en el 2017 (INEI, 2018) determino la siguiente tasa de crecimiento poblacional de acuerdo a la región:

Tabla 4: Tasa de crecimiento promedio anual de la población censada según departamento

Departamento	1940-1961	1961-1972	1972-1981	1981-1993	1993-2007	2007-2017
Total	2,2	2,9	2,5	2,2	1,5	0,7
Amazonas	2,9	4,6	3,0	2,4	0,8	0,1
Áncash	1,5	2,0	1,4	1,2	0,8	0,2
Apurímac	0,5	0,6	0,5	1,4	0,4	0,0
Arequipa	1,9	2,9	3,2	2,2	1,6	1,8
Ayacucho	0,6	1,0	1,1	-0,2	1,5	0,1
Cajamarca	2,0	1,9	1,2	1,7	0,7	-0,3
Callao	4,6	3,8	3,6	3,1	2,2	1,2
Cusco	1,1	1,4	1,7	1,8	0,9	0,3
Huancavelica	1,0	0,8	0,5	0,9	1,2	-2,7
Huánuco	1,6	2,1	1,6	2,7	1,1	-0,6
Ica	2,9	3,1	2,2	2,2	1,6	1,8
Junín	2,1	2,7	2,2	1,6	1,2	0,2
La Libertad	2,0	2,8	2,5	2,2	1,7	1,0
Lambayeque	2,8	3,8	3,0	2,6	1,3	0,7
Lima	4,4	5,0	3,5	2,5	2,0	1,2
Loreto	2,8	2,9	2,8	3,0	1,8	-0,1
Madre de Dios	5,4	3,3	4,9	6,1	3,5	2,6
Moquegua	2,0	3,4	3,5	2,0	1,6	0,8
Pasco	2,0	2,3	2,0	0,5	1,5	-1,0
Piura	2,4	2,3	3,1	1,8	1,3	1,0
Puno	1,1	1,1	1,5	1,6	1,1	-0,8
San Martín	2,6	3,0	4,0	4,7	2,0	1,1
Tacna	2,9	3,4	4,5	3,6	2,0	1,3
Tumbes	3,7	2,9	3,4	3,4	1,8	1,2
Ucayali	6,8	5,9	3,4	5,6	2,2	1,4

Fuente: (INEI, 2018)

2.2.6.2. Tasa de crecimiento de la economía

El (INEI, 2018) determino la tasa de crecimiento del PBI según departamentos cada año, y en la siguiente tabla presenta un promedio del crecimiento anual cada 5 años

Tabla 5: Crecimiento del Producto bruto interno por años

Departamentos	2008-2012	2013-2017
Amazonas	7.5	2.9
Ancash	2.5	2.1
Apurímac	3.3	37.1
Arequipa	5.4	7.3
Ayacucho	8.6	4.0
Cajamarca	6.8	-0.7
Cusco	10.3	4.2
Huancavelica	4.9	1.4
Huánuco	6.5	5.9
Ica	8.4	4.5
Junín	3.2	7.0
La Libertad	5.1	2.1
Lambayeque	7.3	3.0
Lima	6.9	3.5
Loreto	3.6	-0.3
Madre de Dios	1.6	5.2
Moquegua	0.9	2.3
Pasco	-2.2	1.8
Piura	6.2	1.8
Puno	5.6	4.1
San Martín	7.8	4.6
Tacna	1.6	3.6
Tumbes	8.6	1.1
Ucayali	5.0	1.9
Valor Agregado Bruto	6.0	3.6
Impuestos a los Productos	8.3	4.1
Derechos de Importación	11.7	-3.6
Producto Bruto Interno	6.2	3.6

Fuente: (INEI, 2018)



2.2.7. Tráfico generado por el Aeropuerto Internacional Chinchero.

Como indica (Ortúzar & Willumsen, 2008) la planificación de transporte contemporáneo requiere de profesionales muy bien cualificados, motivo por el cual para determinar el volumen vehicular se optó por utilizar los datos determinados por la empresa *ALG Transportation infrastructure & Logistic*, la cual brinda consultoría multidisciplinar sobre administración pública, de negocios, ingeniería, modelamiento de tránsito, operaciones, economía y sistemas de información, con 25 años de trayectoria y más de 1000 proyectos en 35 países. (ALG Transportation Infrastructure & Logistics, 2019)

2.2.7.1. Metodología de previsiones de demanda de tráfico de vehículos

La estimación de la demanda viaria se ha realizado en base a las previsiones de pasajeros del nuevo aeropuerto para el día de diseño: un día de la semana tipo del mes más ocupado del año (agosto 2012). Este día de diseño corresponde al 95% percentil de la distribución anual de 2012; habiendo en dicho año solo 14 días en que se supera ese tráfico.

Para cada uno de los 4 tipos de vehículos considerados (auto particular, taxi, combi/micro y bus discrecional) se han calculado el número de usuarios a partir de las previsiones de pasajeros en la hora programada de los vuelos y en función del reparto modal.

El traslado del aeropuerto de Cusco, desde su actual ubicación urbana a su nueva ubicación a 29 kilómetros del casco urbano, supondrá una modificación del reparto modal fruto de los distintos tiempos de accesos y su coste.

Se considera que disminuirá el tráfico de taxi, ya que su coste por carrera (40 a 45 minutos) puede estar en torno a los 60 PEN (actualmente una carrera de Cusco a Chinchero cuesta 40 PEN), suponiendo un incremento del doble del coste actual (30 PEN). En contrapartida aumentará la cuota modal los modos privados como el auto y la combi/micro.

Además, se hará necesaria la implantación de un servicio de bus regular de calidad, que una el aeropuerto con el casco urbano de Cuzco. El cálculo de vehículos se realiza aplicando los factores de ocupación media determinados con la encuesta de movilidad de los pasajeros del aeropuerto actual.

La estimación de la demanda vehicular se ha realizado para tres horizontes temporales:

- 2021 - Puesta en servicio del aeropuerto
- 2030 – Capacidad para 4.5 Mpax
- 2060 – Capacidad para 6 Mpax

Los siguientes diagramas muestran la demanda según las horas en cada año proyectado.

Figura 29: Demanda horaria de tráfico en el aeropuerto en 2021



Fuente: (ALG Transportation Infraestructure & Logistics, 2013)

Figura 30: Demanda horaria de tráfico en el aeropuerto en 2030



Fuente: (ALG Transportation Infraestructure & Logistics, 2013)

Figura 31: Demanda horaria de tráfico en el aeropuerto en 2060



Fuente: (ALG Transportation Infrastructure & Logistics, 2013)

El tráfico generado por los pasajeros tiene una punta de demanda muy marcada de 6:00 a 7:00, provocada por:

- La punta de vuelos de salida a primera hora para poder enlazar en el día con otros destinos nacionales e internacionales.
- La asimetría de vuelos de llegada y salida produce que una cantidad importante de taxis tengan que regresar vacíos a Cusco, ya que se supera la capacidad de la parrilla y el tiempo de espera en ella es elevado.

Tabla 6: Demanda horaria de tráfico generado por el AICC en 2021

Hora	Taxi		Auto		Micro		Bus Discrecional		Bus Regular		Sub Total		Total
	Entradas	Salidas	Entradas	Salidas	Entradas	Salidas	Entradas	Salidas	Entradas	Salidas	Entradas	Salidas	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	97	42	43	9	27	5	6	3	4	4	177	63	240
6	142	142	135	90	82	55	17	11	4	4	380	302	682
7	85	95	110	106	67	65	14	13	4	4	280	283	563
8	124	124	52	101	32	62	7	13	4	4	219	304	523
9	44	58	69	53	42	33	9	7	4	4	168	155	323
10	74	69	42	67	26	41	5	8	4	4	151	189	340
11	55	31	58	43	35	26	7	5	4	4	159	109	268
12	43	43	51	49	31	30	6	6	4	4	135	132	267
13	44	44	61	50	37	31	8	6	4	4	154	135	289
14	42	57	55	69	34	42	7	9	4	4	142	181	323
15	55	49	60	47	36	28	8	6	4	4	163	134	297
16	112	100	51	59	31	36	6	7	4	4	204	206	410
17	95	95	74	68	45	41	9	9	4	4	227	217	444
18	51	51	66	65	40	39	8	8	4	4	169	167	336
19	77	87	84	77	51	47	11	10	4	4	227	225	452
20	96	96	24	66	15	40	3	8	4	4	142	214	356
21	0	27	0	16	0	10	0	2	4	4	4	59	63
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total	1,236	1,210	1,035	1,035	631	631	131	131	68	68	3,101	3,075	6,176

Fuente: (ALG Transportation Infrastructure & Logistics, 2013)

Tabla 7: Demanda horaria de tráfico generado por el AICC en 2030

Hora	Taxi		Auto		Micro		Bus Discrecional		Bus Regular		Sub Total		Total
	Entradas	Salidas	Entradas	Salidas	Entradas	Salidas	Entradas	Salidas	Entradas	Salidas	Entradas	Salidas	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	115	42	55	18	34	12	7	3	4	4	215	79	294
6	206	206	193	111	117	67	24	14	4	4	544	402	946
7	108	128	129	148	78	90	16	19	4	4	335	389	724
8	134	134	108	120	66	73	14	15	4	4	326	346	672
9	114	114	72	107	44	65	9	13	4	4	243	303	546
10	74	74	46	70	28	43	6	9	4	4	158	200	358
11	79	59	85	58	52	35	11	7	4	4	231	163	394
12	81	82	103	77	63	47	13	10	4	4	264	220	484
13	91	90	76	91	46	55	10	11	4	4	227	251	478
14	54	62	54	84	33	51	7	11	4	4	152	212	364
15	73	60	74	57	45	35	9	7	4	4	205	163	368
16	107	91	71	79	43	48	9	10	4	4	234	232	466
17	112	112	94	74	57	45	12	9	4	4	279	244	523
18	63	63	75	84	46	51	9	11	4	4	197	213	410
19	68	88	91	84	55	51	11	11	4	4	229	238	467
20	105	105	37	74	23	45	5	9	4	4	174	237	411
21	29	45	0	27	0	17	0	3	4	4	33	96	129
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total	1,613	1,555	1,363	1,363	830	830	172	172	68	68	4,046	3,988	8,034

Fuente: (ALG Transportation Infrastructure & Logistics, 2013)

Tabla 8: Demanda horaria de tráfico generado por el AICC en 2060

Hora	Taxi		Auto		Micro		Bus Discrecional		Bus Regular		Sub Total		Total
	Entradas	Salidas	Entradas	Salidas	Entradas	Salidas	Entradas	Salidas	Entradas	Salidas	Entradas	Salidas	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	130	51	63	22	40	13	9	3	4	4	246	93	339
6	251	251	227	130	138	79	29	16	4	4	649	480	1129
7	135	155	165	178	101	108	21	22	4	4	426	467	893
8	179	179	118	147	72	90	15	19	4	4	388	439	827
9	131	131	83	117	50	71	10	15	4	4	278	338	616
10	80	88	60	85	36	52	8	11	4	4	188	240	428
11	84	57	93	66	57	40	12	8	4	4	250	175	425
12	92	92	115	84	70	51	14	11	4	4	295	242	537
13	103	105	82	103	50	63	10	13	4	4	249	288	537
14	69	69	66	95	40	58	8	12	4	4	187	238	425
15	93	76	84	65	51	40	11	8	4	4	243	193	436
16	129	113	88	95	53	58	11	12	4	4	285	282	567
17	127	127	106	88	65	54	13	11	4	4	315	284	599
18	101	101	106	100	64	61	13	13	4	4	288	279	567
19	90	110	129	112	79	68	16	14	4	4	318	308	626
20	149	149	53	108	32	66	7	14	4	4	245	341	586
21	57	73	0	43	0	26	0	5	4	4	61	151	212
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total	2,000	1,927	1,638	1,638	998	998	207	207	68	68	4,911	4,838	9,749

Fuente: (ALG Transportation Infrastructure & Logistics, 2013)

La necesidad de ampliación del aeropuerto, y su techo de pasajeros, vendrá condicionado por el aumento de los visitantes del valle sagrado de Urubamba. Por ello, y favorecido por la ubicación del nuevo aeropuerto AICC, se prevé que en el futuro se desarrolle una mayor oferta hotelera en el valle de Urubamba; por lo que parte de los pasajeros del aeropuerto accederán a él directamente desde o hacia establecimiento hoteleros situados en dicho valle de Urubamba.

Así, se ha considerado la hipótesis que el tráfico generado por el aeropuerto que se dirigirá hacia el valle de Urubamba se irá incrementando progresivamente hasta alcanzar el 30% en el horizonte 2060

Tabla 9: Distribución del tráfico aéreo del AICC por destino

Horizonte	AICC-Cusco	AICC-Urubamba
2021	90%	10%
2030	80%	20%
2060	70%	30%

Fuente: (ALG Transportation Infrastructure & Logistics, 2013)

Teniendo en cuenta el reparto del tráfico del AICC, se ha calculado la demanda horaria de dichas vías para los 3 horizontes de diseño.

Tabla 10: Distribución horaria del tráfico en el eje viario Cusco-Urubamba en el horizonte 2021

Hora	Tráfico originado en el AICC		
	Total	Destino Cusco	Destino Urubamba
0	0	0	0
1	0	0	0
2	0	0	0
3	0	0	0
4	0	0	0
5	241	217	24
6	683	615	68
7	562	506	56
8	521	469	52
9	321	289	32
10	342	308	34
11	269	242	27
12	267	241	27
13	289	260	29
14	322	290	32
15	296	267	30
16	410	369	41
17	445	401	45
18	338	304	34
19	451	406	45
20	355	320	36
21	63	57	6
22	0	0	0
23	0	0	0

Fuente: (ALG Transportation Infrastructure & Logistics, 2013)

Tabla 11: Distribución horaria del tráfico en el eje viario Cusco-Urubamba en el horizonte 2030

Hora	Tráfico originado en el AICC		
	Total	Destino Cusco	Destino Urubamba
0	0	0	0
1	0	0	0
2	0	0	0
3	0	0	0
4	0	0	0
5	297	237	59
6	946	757	189
7	724	579	145
8	671	537	134
9	546	437	109
10	358	286	72
11	393	314	79
12	483	386	97
13	478	382	96
14	363	290	73
15	368	295	74
16	468	374	94
17	522	417	104
18	410	328	82
19	466	373	93
20	412	329	82
21	130	104	26
22	0	0	0
23	0	0	0

Fuente: (ALG Transportation Infrastructure & Logistics, 2013)

Tabla 12: Distribución horaria del tráfico en el eje viario Cusco-Urubamba en el horizonte 2060

Hora	Tráfico originado en el AICC		
	Total	Destino Cusco	Destino Urubamba
0	0	0	0
1	0	0	0
2	0	0	0
3	0	0	0
4	0	0	0
5	337	236	101
6	1,128	790	339
7	893	625	268
8	826	578	248
9	617	432	185
10	428	299	128
11	426	299	128
12	538	376	161
13	537	376	161
14	425	298	128
15	436	305	131
16	566	396	170
17	601	421	180
18	567	397	170
19	625	437	187
20	585	409	175
21	213	149	64
22	0	0	0
23	0	0	0

Fuente: (ALG Transportation Infrastructure & Logistics, 2013)

2.2.8. Metodología del HCM 2010 para Carreteras de dos carriles

2.2.8.1. Alcance de la metodología

De acuerdo con el (Transportation Research Board, 2010) La presente metodología desarrolla un análisis operacional para tramos de carreteras de dos carriles, donde ambas direcciones pueden ser analizadas por separado para obtener una estimación completa de las condiciones de funcionamiento, la cual aborda el análisis de:

- Tramos direccionales en terreno general (plano u ondulado),
- Tramos direccionales en pendientes específicas,
- Tramos direccionales incluyendo carriles de adelantamiento.

Para este análisis todo tramo en terreno montañoso, y los que tengan más del 3% de pendiente en una longitud mayor a 970 m (0,60 millas), debe ser analizado como pendiente específica.

La metodología es generalmente utilizada para determinar los niveles de servicio en un tramo direccional uniforme mediante la estimación de las medidas de eficacia que definen los niveles de servicio, velocidad promedio de viaje, porcentaje de tiempo usado viajando en colas, y porcentaje de la velocidad a flujo libre (ATS, PTSF, PFFS). (Transportation Research Board, 2010)

2.2.8.2. Limitaciones de la metodología

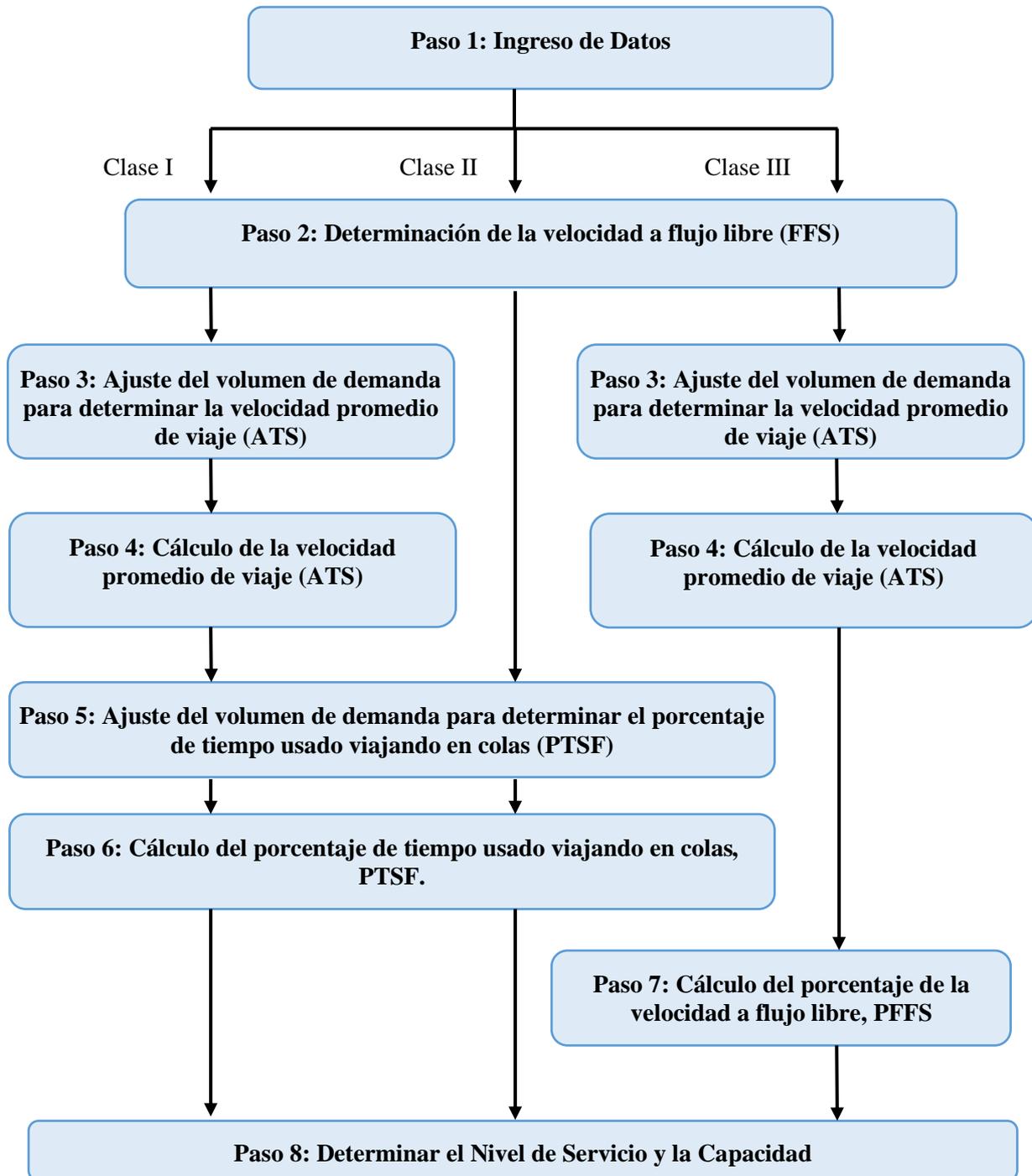
De acuerdo con el (Transportation Research Board, 2010) en esta metodología no se incluye a carreteras de dos carriles con intersecciones semaforizadas, ni carreteras de dos carriles en áreas urbanas y suburbanas con múltiples intersecciones semaforizadas con dos o menos millas de distancia entre ellas (3,22 km o menos.).

2.2.8.3. Procedimiento Metodológico

En la **Figura 32** el flujograma ilustra los pasos básicos en la metodología para carreteras de dos carriles. Debido a que las tres clases de carreteras utilizan diferentes medidas de eficacia para determinar los niveles de servicio, no se aplican todos los pasos a cada clase de carretera.

Se debe tener en cuenta que, en la etapa computacional, para la estimación de la Velocidad promedio de viaje ATS se aplica sólo a las carreteras Clase I y Clase III, mientras que el paso para estimar el porcentaje de tiempo usado viajando en colas (PTSF) se aplica sólo a carreteras Clase I y II. El paso para la estimación del porcentaje de la velocidad a flujo libre (PFFS) se aplica sólo a la Clase III. (Transportation Research Board, 2010)

Figura 32: Flujograma de metodología del HCM 2010 para carreteras de dos carriles



Fuente: (Transportation Research Board, 2010)

2.2.8.3.1. Paso 1: Datos de Ingreso

La **Tabla 13** enumera la información que debe estar disponible para poder analizar un tramo de carretera de dos carriles.

(Transportation Research Board, 2010)



2.2.8.3.1.1. Datos de entrada necesarios y valores por defecto

Como describe el (Transportation Research Board, 2010) La **Tabla 13** también contiene valores sugeridos por defecto para su uso cuando la información del tramo en estudio no está disponible. Sin embargo, se advierte, que cada uso de un valor por defecto en lugar de una variable medida en campo del tramo específico hace que los resultados del análisis sean más aproximados y menos relacionados con las condiciones específicas que describen el sitio de estudio. Los valores predeterminados deben usarse sólo cuando no se pueden realizar las mediciones de campo.

El uso de algunos valores por defecto es menos problemático que otros, por ejemplo, el ancho de carril y bermas de 3.66 y 1.83 metros (12 y 6 pies), respectivamente, son comunes, sobre todo en carreteras Clase I. Una evaluación general de terreno suele ser sencilla y sólo requiere el conocimiento general de la zona a través de la cual se desarrolla la carretera.

Las densidades de puntos de acceso son más difíciles y tienden a variar ampliamente de forma, sitio por sitio. Estimar el porcentaje zonas de prohibición de paso sobre la base de una evaluación generalizada de terreno es también difícil, ya que los detalles de la alineación vertical y horizontal pueden tener un impacto significativo en este factor. (Transportation Research Board, 2010)

La velocidad a flujo libre (FFS) se mide mejor en el lugar o en un sitio similar. Mientras que los ajustes a una velocidad básica a flujo libre (BFFS) se proporcionan como parte de la metodología, no se da una orientación firme de cómo se determina el BFFS. Las sugerencias por defecto del cuadro son muy aproximadas. (Transportation Research Board, 2010)

En términos de los datos de demanda, el período de análisis por recomendación del HCM es de 15 min (aunque pueden ser examinados períodos más largos). El factor de hora pico (PHF) es típico, pero podría variar significativamente en función de las características locales de generación de viajes. (Transportation Research Board, 2010)

La división direccional se observa mejor directamente ya que puede variar ampliamente con el tiempo, incluso en el mismo lugar. La recomendación por defecto para la presencia de vehículos pesados es también altamente aproximada. Este factor varía ampliamente con las condiciones locales. (Transportation Research Board, 2010)

Como es el caso con todos los valores por defecto, estos valores deben ser utilizados con cuidado, y sólo cuando los datos específicos del sitio no pueden ser adquiridos por algún motivo razonable. (Transportation Research Board, 2010)

Tabla 13: Datos de entrada necesarios por el HCM 2010 en carreteras de dos carriles

Datos Necesarios	Valores Recomendados por Defecto
Datos Geométricos	
Clasificación de Carretera	Debe ser seleccionada apropiadamente
Ancho de Carril	3.66 m (12 ft)
Ancho de Berma	1.83 m (6 ft)
Densidad del punto de Acceso	Clase I y II : 8/mi , Clase III: 16/mi
Terreno	Plano u Ondulado
Porcentaje de zona de no rebase	Plano: 20% Ondulado :40% Escarpado: 80%
Velocidad de Diseño	Límite de velocidad + 16.09 km/h (10 mi/h)
Longitud de Carril de Paso (Solo si presenta)	Debe ser específico del sitio
Datos de Tránsito	
Volumen Horario de Vehículos	Debe ser específico del sitio
Duración del periodo de análisis	15 min (0.25 h)
Factor de Hora Punta	0.88
División direccional	60/40
Porcentaje de Vehículos Pesados	6% Camiones

Fuente: (Transportation Research Board, 2010)

2.2.8.3.2. Paso 2: Determinación de la velocidad a flujo libre (FFS)

Un paso clave en el análisis de carreteras de dos carriles es la determinación de la velocidad a flujo libre (FFS) del tramo. Existen tres formas para determinarlo.

2.2.8.3.2.1. Medición directa en campo

Es preferible realizar la medición directa de campo en el tramo de carretera. Las medidas se deben tomar sólo en la dirección analizada; si es necesario analizar ambas direcciones, se deben analizar y tomar datos en cada dirección. Cada medición direccional debe basarse en una muestra aleatoria de por lo menos 100 velocidades de vehículos. El FFS puede medirse directamente como la velocidad media bajo condiciones de baja demanda (es decir, cuando el flujo vehicular en ambos sentidos es menor o igual a 200 veh/h). Si no se puede realizar la medición directa en campo, se puede utilizar los datos de un tramo similar (la misma clase carretera, el mismo límite de velocidad, ambiente similar, etc.) (Transportation Research Board, 2010)

2.2.8.3.2.2. Medición directa en campo con altos flujos vehiculares

(Transportation Research Board, 2010) Indique que en algunas carreteras, puede ser difícil o imposible observar menos de 200 veh/h. En tales casos, la muestra de la velocidad se puede tomar con flujos mayores y realizar un ajuste. Se realiza el mismo método de muestreo: donde cada dirección se observa por separado, Cada dirección debe incluir al menos 100 velocidades observadas, donde la velocidad media se ajusta con la **Ecuación 5**:

$$FFS = S_{FM} + 0.00776 \left(\frac{v}{f_{hv,ATS}} \right) \quad \text{Ecuación 5}$$

Dónde: FFS = Velocidad a flujo libre (mi/h);

S_{FM} = Promedio de velocidad de la muestra ($v > 200$ vh/h) (mi/h);

v = volumen de demanda total, en ambas direcciones, durante el período de mediciones de velocidad (veh/h); y

$f_{hv,ATS}$ = Factor de ajuste por vehículos pesados para (ATS), de la **Ecuación 8** o la **Ecuación 9**

2.2.8.3.2.3. Estimación de la velocidad a flujo libre (FFS)

La velocidad a flujo libre se puede estimar indirectamente si no se dispone de datos de campo. Este es un mayor desafío en las carreteras de dos carriles que en otros tipos de vías de flujo ininterrumpido. La FFS en las carreteras de dos carriles cubre una gama significativa, desde un mínimo de 72 km/h (45 mi/h) hasta un máximo de 112 km/h (70 mi/h). (Transportation Research Board, 2010)

Para estimar la FFS, el analista debe caracterizar las condiciones de funcionamiento de la carretera en términos de una velocidad base a flujo libre (*Basic Free Flow Speed*, BFFS) que refleja la naturaleza del tráfico y el alineamiento de la carretera. Desafortunadamente, debido al amplio margen de velocidades que se producen y la importancia de factores locales y regionales que influyen en la velocidad deseada por el conductor, es poca la orientación sobre la estimación de los BFFS que se puede dar. (Transportation Research Board, 2010)

Las estimaciones de BFFS pueden desarrollarse sobre la base de datos de velocidad y conocimientos locales de las condiciones de operación en carreteras similares. Como se detallará adelante, una vez que la BFFS se determina, se deben realizar ajustes por anchos de carril, berma y por la densidad de puntos de acceso no semaforizados para estimar la velocidad a flujo libre (FFS). (Transportation Research Board, 2010)

Conceptuando, la velocidad base a flujo libre (BFFS) es la velocidad esperada de acuerdo a las características de la vía, alineamiento horizontal y vertical, anchos de carril, berma y donde no se presenten puntos de acceso a la carretera. Por lo tanto, la velocidad de diseño de la carretera podría ser un estimador aceptable de la BFFS, ya que se basa principalmente en el



alineamiento horizontal y vertical. Los límites de velocidad pueden no reflejar las condiciones actuales o deseos del conductor. Una estimación aproximada de BFFS podría ser tomado como la velocidad límite más 16 km/h (10 mi/h). (Transportation Research Board, 2010)

Una vez que se determina la BFFS, el FFS real puede estimarse como sigue:

$$FFS = BFFS - f_{LS} - f_A \tag{Ecuación 6}$$

Donde: FFS = Velocidad a flujo libre (mi/h)

$BFFS$ = Velocidad a flujo libre base (mi/h)

f_{LS} = Factor de ajuste por ancho de carril y de berma

f_A = Factor de ajuste por densidad de puntos de acceso

Cuando se utilizan las mediciones de campo para estimar la velocidad a flujo libre FFS, las aproximaciones y las técnicas de muestreo deben aplicarse.

Los factores de ajuste para utilizar en la **Ecuación 6** se encuentran en la **Tabla 14** (carril y ancho de bermas) y en la **Tabla 15** (densidad de puntos de acceso).

Tabla 14: Factor de ajuste para ancho de carril y de berma (fls)

Ancho de Carril (ft)	Ancho de Berma (ft)			
	≥ 0 < 2	≥ 9 < 10	≥ 9 < 10	≥ 9 < 10
≥ 9 < 10	6.4	4.8	3.5	2.2
≥ 10 < 11	5.3	3.7	2.4	1.1
≥ 11 < 12	4.7	3	1.7	0.4
≥ 12	4.2	2.6	1.3	0

Fuente: (Transportation Research Board, 2010)

Tabla 15: Factor de ajuste por densidad de accesos (FA)

Numero de Accesos por Milla (Dos Direcciones)	Reducción en FFS (mi/h)
0	0
10	2.5
20	5
30	7.5
40	10

Fuente: (Transportation Research Board, 2010)

La densidad de puntos de acceso se calcula dividiendo el número total de intersecciones no semaforizadas y accesos de entrada en ambos lados del tramo de carretera por la longitud del tramo (en kilómetros o en millas). Por lo tanto, analizando las dos direcciones de la vía y las velocidades a flujo libre será la misma en ambas direcciones. Si el FFS se mide en el campo, el valor podría ser diferente en cada dirección. (Transportation Research Board, 2010)

Si una carretera tiene curvas horizontales con velocidades de diseño sustancialmente por debajo de los del resto del tramo, puede ser deseable determinar el FFS por separado para las curvas y tangentes y calcular una FFS promedio ponderado para el segmento en su conjunto. (Transportation Research Board, 2010)

Los datos para las relaciones de la velocidad a flujo libre (FFS) se incluyen tanto para el tránsito de conductores frecuentes y los recreacionales. No hay diferencias significativas entre los dos, Sin embargo, se espera que los conductores frecuentes y otros regulares usen la carretera con mayor eficiencia que los usuarios recreacionales y ocasionales. Si el efecto de población de conductores es una preocupación, el FFS debe medirse en el campo. (Transportation Research Board, 2010)

2.2.8.3.3. Paso 3: Ajuste del volumen de demanda por la velocidad promedio (ATS)

De acuerdo con el (Transportation Research Board, 2010) El ajuste por la velocidad promedio de viaje (*Average Travel Speed*) se aplica solamente para las carreteras de Clases I y III. Los niveles de servicio de carreteras Clase II no se basan en la velocidad promedio y este paso no es necesario.

Los volúmenes de demanda en ambas direcciones (dirección de análisis y dirección opuesta) deben convertirse en una tasa equivalente de flujo vehicular bajo condiciones ideales con la **Ecuación 7.**



$$v_{i,ATS} = \frac{V_i}{PHF \times f_{g,ATS} \times f_{HV,ATS}} \quad \text{Ecuación 7}$$

Dónde: $v_{i,ATS}$ = Volumen de demanda ajustado para ATS (vl/h)

i = “d” (dirección de análisis) y “o” (dirección opuesta)

V_i = Volumen horario de máxima demanda para la dirección analizada (veh/h)

$f_{g,ATS}$ = Factor de ajuste por pendiente, de la **Tabla 16** o de la **Tabla 17**

$f_{HV,ATS}$ = Factor de ajuste por vehículos pesados de la **Ecuación 8**

PHF = Factor de hora punta

2.2.8.3.3.1. Factor de ajuste por pendiente para (ATS)

(Transportation Research Board, 2010) Indica que el factor de ajuste por pendiente depende del tipo de terreno, divididos en:

- Tramos $\geq 3,22$ Km (≥ 2 mi) de terreno plano
- Tramos $\geq 3,22$ Km (≥ 2 mi) de terreno ondulado
- Pendiente específica en ascenso
- Pendiente específica en descenso

Cualquier tramo con una pendiente de 3% o más en una longitud de 0.97 km (0.6 millas) o más debe ser analizado como una pendiente específica de ascenso o descenso, dependiendo de la dirección del análisis.

La **Tabla 16** muestra los factores de ajuste para tramos de terreno plano u ondulado, así como para descensos específicos.

Se utilizará como dato de ingreso el volumen de demanda en la dirección de análisis dirección ($V_{vph,}$) expresada en vehículos por hora.

**Tabla 16: Factor de ajuste por la pendiente (ATS) en terreno general o descensos específicos**

Volumen de Demanda, V En una Dirección (Veh/h)	Terreno Plano y Descensos Específicos	Terreno Ondulado
≤100	1.00	0.67
200	1.00	0.75
300	1.00	0.83
400	1.00	0.90
500	1.00	0.95
600	1.00	0.97
700	1.00	0.98
800	1.00	0.99
≥900	1.00	1.00

Fuente: (Transportation Research Board, 2010)

Si la demanda ha sido calculada en base a una hora, esta deberá ser dividida por el factor de hora punta para obtener el volumen. Este valor también se usa en otras tablas de factores de ajuste asociadas a la **Ecuación 14**. (Transportation Research Board, 2010)

Se debe tener en cuenta que el factor de ajuste para terreno plano es de 1,00, ya que este tipo de terreno se encuentra en las condiciones de base. Para los fines de factores de ajuste los tramos de descensos específicos se tratan como terreno plano. (Transportation Research Board, 2010)

La **Tabla 17** muestra los factores de ajuste para ascensos específicos. El impacto negativo de los tramos de ascenso en carreteras de dos carriles aumenta a medida que la pendiente se hace más severa y si la longitud del tramo aumenta. El impacto, sin embargo, disminuye a medida que la tasa de flujo aumenta. A mayores tasas de flujo, las velocidades son más bajas y el impacto adicional por ascensos es menos severo. (Transportation Research Board, 2010)

Tabla 17: Factor de ajuste por la pendiente para (ATS) en ascensos específicos

Pendiente %	Longitud de la pendiente (mi)	Volumen de demanda, V En una dirección (Veh/h)								
		≤100	200	300	400	500	600	700	800	≥900
≥ 3 <3.5	0.25	0.78	0.84	0.87	0.91	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	0.50	0.75	0.83	0.86	0.90	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	0.75	0.73	0.81	0.85	0.89	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	1.00	0.73	0.79	0.83	0.88	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	1.50	0.73	0.79	0.83	0.87	0.99	0.99	1.00	1.00	1.00
	2.00	0.73	0.79	0.82	0.86	0.98	0.98	0.99	1.00	1.00
	3.00	0.73	0.78	0.82	0.85	0.95	0.96	0.96	0.97	0.98
	≥4.00	0.73	0.78	0.81	0.85	0.94	0.94	0.95	0.95	0.96
≥ 3.5 <4.5	0.25	0.75	0.83	0.86	0.90	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	0.50	0.72	0.80	0.84	0.88	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	0.75	0.67	0.77	0.81	0.86	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	1.00	0.65	0.73	0.77	0.81	0.94	0.95	0.97	1.00	1.00
	1.50	0.63	0.72	0.76	0.80	0.93	0.95	0.96	1.00	1.00
	2.00	0.62	0.70	0.74	0.79	0.93	0.94	0.96	1.00	1.00
	3.00	0.61	0.69	0.74	0.78	0.92	0.93	0.94	0.98	1.00
	≥4.00	0.61	0.69	0.73	0.78	0.91	0.91	0.92	0.96	1.00
≥ 4.5 <5.5	0.25	0.71	0.79	0.83	0.88	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	0.50	0.60	0.70	0.74	0.79	0.94	0.95	0.97	1.00	1.00
	0.75	0.55	0.65	0.70	0.75	0.91	0.93	0.95	1.00	1.00
	1.00	0.54	0.64	0.69	0.74	0.91	0.93	0.95	1.00	1.00
	1.50	0.52	0.62	0.67	0.72	0.88	0.90	0.93	1.00	1.00
	2.00	0.51	0.61	0.66	0.71	0.87	0.89	0.92	0.99	1.00
	3.00	0.51	0.61	0.65	0.70	0.86	0.88	0.91	0.98	0.99
	≥4.00	0.51	0.60	0.65	0.69	0.84	0.86	0.88	0.95	0.97
≥ 5.5 <6.5	0.25	0.57	0.68	0.72	0.77	0.93	0.94	0.96	1.00	1.00
	0.50	0.52	0.62	0.66	0.71	0.87	0.90	0.92	1.00	1.00
	0.75	0.49	0.57	0.62	0.68	0.85	0.88	0.90	1.00	1.00
	1.00	0.46	0.56	0.60	0.65	0.82	0.85	0.88	1.00	1.00
	1.50	0.44	0.54	0.59	0.64	0.81	0.84	0.87	0.98	1.00
	2.00	0.43	0.53	0.58	0.63	0.81	0.83	0.86	0.97	0.99
	3.00	0.41	0.51	0.56	0.61	0.79	0.82	0.85	0.97	0.99
	≥4.00	0.40	0.50	0.55	0.61	0.79	0.82	0.85	0.97	0.99
≥ 6.5	0.25	0.54	0.64	0.68	0.73	0.88	0.90	0.92	1.00	1.00
	0.50	0.43	0.53	0.57	0.62	0.79	0.82	0.85	0.98	1.00
	0.75	0.39	0.49	0.54	0.59	0.77	0.80	0.83	0.96	1.00
	1.00	0.37	0.45	0.50	0.54	0.74	0.77	0.81	0.96	1.00
	1.50	0.35	0.45	0.49	0.54	0.71	0.75	0.79	0.96	1.00
	2.00	0.34	0.44	0.48	0.53	0.71	0.74	0.78	0.94	0.99
	3.00	0.34	0.44	0.48	0.53	0.70	0.73	0.77	0.93	0.98
	≥4.00	0.33	0.43	0.47	0.52	0.70	0.73	0.77	0.91	0.95

Fuente: (Transportation Research Board, 2010)

2.2.8.3.3.2. Factor de ajuste por presencia de vehículos pesados (ATS)

De acuerdo con (Transportation Research Board, 2010) las condiciones base de las carreteras de dos carriles precisan que el 100% de vehículos sean ligeros, esta es una ocurrencia rara, y la presencia de vehículos pesados en el flujo de tráfico reduce el ATS, motivo por el cual se debe realizar los ajustes necesarios.

Para determinar el factor de ajuste por vehículos pesados se tiene que realizar dos pasos:

- Se determina el factor de equivalencia de vehículos ligeros para los camiones E_T y los vehículos recreacionales RVs (E_R)
- Se calcula el factor de ajuste por vehículos pesados con la **Ecuación 8**

$$f_{HV,ATS} = \frac{1}{1 + P_T(E_T - 1) + P_R(E_R - 1)} \quad \text{Ecuación 8}$$

Dónde: $f_{HV,ATS}$ = Factor de ajuste por vehículos pesados para calcular ATS

P_T = Porcentaje de vehículos pesados en el flujo vehicular (decimal)

P_R = Porcentaje de vehiculos recreacionales en el flujo vehicular (decimal)

E_T = Factor de equivalencia en vehículos ligeros para vehículos pesados,

E_R = Factor de equivalencia en vehículos ligeros para vehículos recreativos

El factor de equivalencia de vehiculos pesados y recreacionales es el número de vehículos desplazados del flujo vehicular por un camión o vehículo recreativo. Estos factores se definen para varias situaciones:

- Tramos largos de terreno plano u ondulado
- Pendientes específicas de ascenso, y
- Pendientes específicas de descenso.

La **Tabla 18** contiene factores de equivalencia en tramos generales de vía y en descensos específicos, que son tratados como terreno plano en la mayoría de los casos.

Tabla 18: Factor de equivalencia de vehículos pesados y recreacionales en terreno general y descensos específicos para ATS

Tipo de vehículo	Volumen de Demanda por dirección (Veh/h)	Tipo de Terreno	
		Plano y pendientes descendentes	Ondulado
Pesados, E_T	≤ 100	1.9	2.7
	200	1.5	2.3
	300	1.4	2.1
	400	1.3	2.00
	500	1.2	1.8
	600	1.1	1.7
	700	1.1	1.6
	800	1.1	1.4
	≥ 900	1.0	1.3
Recreativos (E_R)	Todos	1.0	1.1

Fuente: (Transportation Research Board, 2010)

La **Tabla 19** y la **Tabla 20** muestran vehículos equivalentes para vehículos recreativos y camiones, respectivamente, en pendientes de ascenso específicas.

Tabla 19: Factor de equivalencia de vehículos recreacionales (E_r) en ascensos específicos para ATS.

Pendiente %	Longitud de la pendiente (mi)	Volumen de demanda, V En una dirección (veh/h)								
		≤ 100	200	300	400	500	600	700	800	≥ 900
$\geq 3 < 3.5$	≤ 0.25	1.1	1.1	1.1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	$>0.25 \leq 0.75$	1.2	1.2	1.1	1.1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	$>0.75 \leq 1.25$	1.3	1.2	1.2	1.1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	$>1.25 \leq 2.25$	1.4	1.3	1.2	1.1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	>2.25	1.5	1.4	1.3	1.2	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
$\geq 3.5 < 4.5$	≤ 0.75	1.3	1.2	1.2	1.1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	$>0.75 \leq 3.50$	1.4	1.3	1.2	1.1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	>3.50	1.5	1.4	1.3	1.2	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
$\geq 4.5 < 5.5$	≤ 2.50	1.5	1.4	1.3	1.2	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	>2.50	1.6	1.5	1.4	1.2	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
$\geq 5.5 < 6.5$	≤ 0.75	1.5	1.4	1.3	1.1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	$>0.75 \leq 2.50$	1.6	1.5	1.4	1.2	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	$>2.50 \leq 3.50$	1.6	1.5	1.4	1.3	1.2	1.1	1.0	1.0	1.0
	>3.50	1.6	1.6	1.6	1.5	1.5	1.4	1.3	1.2	1.1
≥ 6.5	≤ 2.50	1.6	1.5	1.4	1.2	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	$>2.50 \leq 3.50$	1.6	1.5	1.4	1.2	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3
	>3.50	1.6	1.6	1.6	1.5	1.5	1.5	1.4	1.4	1.4

Fuente: (Transportation Research Board, 2010)

Tabla 20: Factor de equivalencia de vehículos pesados (E_t) en ascensos específicos para ATS

Pendiente %	Longitud de la pendiente (mi)	Volumen de demanda, V En una dirección (veh/h)								
		≤100	200	300	400	500	600	700	800	≥900
≥ 3 <3.5	0.25	2.6	2.4	2.3	2.2	1.8	1.8	1.7	1.3	1.1
	0.50	3.7	3.4	3.3	3.2	2.7	2.6	2.6	2.3	2.0
	0.75	4.6	4.4	4.3	4.2	3.7	3.6	3.4	2.4	1.9
	1.00	5.2	5.0	4.9	4.9	4.4	4.2	4.1	3.0	1.6
	1.50	6.2	6.0	5.9	5.8	5.3	5.0	4.8	3.6	2.9
	2.00	7.3	6.9	6.7	6.5	5.7	5.5	5.3	4.1	3.5
	3.00	8.4	8.0	7.7	7.5	6.5	6.2	6.0	4.6	3.9
	≥4.00	9.4	8.8	8.6	8.3	7.2	6.9	6.6	4.8	3.7
≥ 3.5 <4.5	0.25	3.8	3.4	3.2	3.0	2.3	2.2	2.2	1.7	1.5
	0.50	5.5	5.3	5.1	5.0	4.4	4.2	4.0	2.8	2.2
	0.75	6.5	6.4	6.5	6.5	6.3	5.9	5.6	3.6	2.6
	1.00	7.9	7.6	7.4	7.3	6.7	6.6	6.4	5.3	4.7
	1.50	9.6	9.2	9.0	8.9	8.1	7.9	7.7	6.5	5.9
	2.00	10.3	10.1	10.0	9.9	9.4	9.1	8.9	7.4	6.7
	3.00	11.4	11.3	11.2	11.2	10.7	10.3	10.0	8.0	7.0
	≥4.00	12.4	12.2	12.2	12.1	11.5	11.2	10.8	8.6	7.5
≥ 4.5 <5.5	0.25	4.4	4.0	3.7	3.5	2.7	2.7	2.7	2.6	2.5
	0.50	6.0	6.0	6.0	6.0	5.9	5.7	5.6	4.6	4.2
	0.75	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5
	1.00	9.2	9.2	9.1	9.1	9.0	9.0	9.0	8.9	8.8
	1.50	10.6	10.6	10.6	10.6	10.5	10.4	10.4	10.2	10.1
	2.00	11.8	11.8	11.8	11.8	11.6	11.6	11.5	11.1	10.9
	3.00	13.7	13.7	13.6	13.6	13.3	13.1	13.0	11.9	11.3
	≥4.00	15.3	15.3	15.2	15.2	14.6	14.2	13.8	11.3	10.0
≥ 5.5 <6.5	0.25	4.8	4.6	4.5	4.4	4.0	3.9	3.8	3.2	2.9
	0.50	7.2	7.2	7.2	7.2	7.2	7.2	7.2	7.2	7.2
	0.75	9.1	9.1	9.1	9.1	9.1	9.1	9.1	9.1	9.1
	1.00	10.3	10.3	10.3	10.3	10.3	10.3	10.3	10.2	10.1
	1.50	11.9	11.9	11.9	11.9	11.8	11.8	11.8	11.7	11.6
	2.00	12.8	12.8	12.8	12.8	12.7	12.7	12.7	12.6	12.5
	3.00	14.4	14.4	14.4	14.4	14.3	14.3	14.3	14.2	14.1
	≥4.00	15.4	15.4	15.3	15.3	15.2	15.1	15.1	14.9	14.8
≥ 6.5	0.25	5.1	5.1	5.0	5.0	4.8	4.7	4.7	4.5	4.4
	0.50	7.8	7.8	7.8	7.8	7.8	7.8	7.8	7.8	7.8
	0.75	9.8	9.8	9.8	9.8	9.8	9.8	9.8	9.8	9.8
	1.00	10.4	10.4	10.4	10.4	10.4	10.4	10.4	10.3	10.2
	1.50	12.0	12.0	12.0	12.0	11.9	11.9	11.9	11.8	11.7
	2.00	12.9	12.9	12.9	12.9	12.8	12.8	12.8	12.7	12.6
	3.00	14.5	14.5	14.5	14.5	14.4	14.4	14.4	14.3	14.2
	≥4.00	15.4	15.4	15.4	15.4	15.3	15.3	15.3	15.2	15.1

Fuente: (Transportation Research Board, 2010)



2.2.8.3.3.3. Factor de ajuste en descenso por desplazamiento de vehículos pesados a velocidad lenta (ATS)

Como él (Transportation Research Board, 2010) se señaló anteriormente, cualquier pendiente de descenso de 3% o más en una longitud de 0.97 km (0.6 mi) debe ser analizada como pendiente específica. Si la pendiente es variable, se debe analizar como una pendiente compuesta, para lo cual se utilizará el promedio ponderado de pendientes expresado el resultado como un porcentaje.

La mayoría de los descensos se tratan como terreno plano para propósitos de análisis. Sin embargo, algunas pendientes de descenso son lo suficientemente graves como para obligar a algunos camiones a desplazarse a una velocidad lenta. En tal caso, el conductor del camión se ve forzado a operar utilizando el freno del motor, ya que el sistema de frenado normal no sería suficiente para desacelerar o detener el vehículo que ha ganado demasiada velocidad por la pendiente. No existen pautas generales para identificar cuándo o dónde ocurrirán estas situaciones, aparte de la observación directa de la operación de vehículos pesados. (Transportation Research Board, 2010)

Cuando existe esta situación, el factor de ajuste de vehículos pesados $f_{HV,ATS}$ se desarrolla con la **Ecuación 9** en lugar de la **Ecuación 8**:

$$f_{hv,ATS} = \frac{1}{1 + P_{TC} \chi (E_{TC} - 1) + (1 - P_{TC}) \chi P_T \chi (E_T - 1) + P_R (E_R - 1)} \quad \text{Ecuación 9}$$

Dónde: P_{TC} = Porcentaje de camiones operando a velocidad lenta (decimal) y

E_{TC} = Factor de equivalencia para camiones que operan a velocidad lenta de la Tabla 21

Todas las demás variables se definen como se explicó previamente. Se observa que P_{TC} es la tasa de flujo de los vehículos pesados a velocidad lenta dividido por la tasa de flujo de todos los camiones

Tabla 21: Factor de equivalencia para camiones en descenso que operan a velocidad lenta ETC

Diferencia entre FFS y la velocidad Lenta de V. Pesados (mi/h)	Volumen de demanda, V En una dirección (veh/h)								
	≤100	200	300	400	500	600	700	800	≥900
≤15	4.7	4.1	3.6	3.1	2.6	2.1	1.6	1	1
20	9.9	8.7	7.8	6.7	5.8	4.9	4	2.7	1
25	15.1	13.5	12	10.4	9	7.7	6.4	5.1	3.8
30	22.0	19.8	17.5	15.6	13.1	11.6	9.2	6.1	4.1
35	29.0	26	23.1	20.1	17.3	14.6	11.9	9.2	6.5
≥40	35.9	32.3	28.6	24.9	21.4	18.1	14.7	11.3	7.9

Fuente: (Transportation Research Board, 2010)

2.2.8.3.4. Paso 4: Calculo de la velocidad promedio de viaje (ATS)

Así como en el caso con el Paso 3, este paso se aplica sólo a carreteras de dos carriles Clase I y Clase III, El ATS se calcula a partir de la velocidad a flujo libre (FFS), El volumen de demanda ajustado, el volumen de demanda ajustado opuestos y el porcentaje de zonas de no rebase en la dirección de análisis. (Transportation Research Board, 2010)

Para desarrollar el cálculo se utiliza la **Ecuación 10**.

$$ATS_d = FFS - 0.00776(v_{d,ATS} + v_{o,ATS}) - f_{np,ATS} \quad \text{Ecuación 10}$$

Dónde: ATS_d = Velocidad promedio de viaje en la dirección analizada (mi/h)

FFS = Velocidad a flujo libre (mi/h)

$v_{d,ATS}$ = Volumen vehicular ajustado a las condiciones base para determinar ATS en la dirección de análisis (pc/h)

$v_{o,ATS}$ = Volumen vehicular ajustado a las condiciones base para determinar ATS en la dirección de análisis (pc/h)

$f_{np,ATS}$ = Factor de ajuste para determinar el porcentaje de zonas de no rebase en la dirección de análisis de la Tabla 22.

Tabla 22: Factores de ajuste por zonas de no rebase para ATS (Fnp,ATS)

Volumen de demanda ajustado Opuesto vo (veh/h)	Porcentaje de Zonas de No rebase				
	≤20	40	60	80	100
FPS ≥ 65 mi/h					
≤100	1.1	2.2	2.8	3	3.1
200	2.2	3.3	3.9	4	4.2
400	1.6	2.3	2.7	2.8	2.9
600	1.4	1.5	1.7	1.9	2
800	0.7	1.0	1.2	1.4	1.5
1000	0.6	0.8	1.1	1.1	1.2
1200	0.6	0.8	0.9	1.0	1.1
1400	0.6	0.7	0.9	0.9	0.9
≥1600	0.6	0.7	0.7	0.7	0.8
FPS ≥ 60 mi/h					
≤100	0.7	1.7	2.5	2.8	2.9
200	1.9	2.9	3.7	4	4.2
400	1.4	2	2.5	2.7	3.9
600	1.1	1.3	1.6	1.9	2
800	0.6	0.9	1.1	1.3	1.4
1000	0.6	0.7	0.9	1.1	1.2
1200	0.5	0.7	0.9	0.9	1.1
1400	0.5	0.6	0.8	0.8	0.9
≥1600	0.5	0.6	0.7	0.7	0.7
FPS ≥ 55 mi/h					
≤100	0.5	1.2	2.2	2.6	2.7
200	1.5	2.4	3.5	3.9	4.1
400	1.3	1.9	2.4	2.7	2.8
600	0.9	1.1	1.6	1.8	1.9
800	0.5	0.7	1.1	1.2	1.4
1000	0.5	0.6	0.8	0.9	1.1
1200	0.5	0.6	0.7	0.9	1
1400	0.5	0.6	0.7	0.7	0.9
≥1600	0.5	0.6	0.6	0.6	0.7
FPS ≥ 50 mi/h					
≤100	0.2	0.7	1.9	2.4	2.5
200	1.2	2	3.3	3.9	4
400	1.1	1.6	2.2	2.6	2.7
600	0.6	0.9	1.4	1.7	1.9
800	0.4	0.6	0.9	1.2	1.3
1000	0.4	0.4	0.7	0.9	1.1
1200	0.4	0.4	0.7	0.8	1
1400	0.4	0.4	0.6	0.7	0.8
≥1600	0.4	0.4	0.5	0.5	0.5
FPS ≤ 45 mi/h					
≤100	0.1	0.4	1.7	2.2	2.4
200	0.9	1.6	3.1	3.8	4
400	0.9	0.5	2	2.5	2.7
600	0.4	0.3	1.3	1.7	1.8
800	0.3	0.3	0.8	1.1	1.2
1000	0.3	0.3	0.6	0.8	1.1
1200	0.3	0.3	0.6	0.7	1
1400	0.3	0.3	0.6	0.6	0.7
≥1600	0.3	0.3	0.4	0.4	0.6

Fuente: (Transportation Research Board, 2010)

Para la **Tabla 22** se utiliza el volumen de demanda ajustado del flujo opuesto (v_o) en vehículos por hora. En este punto en el proceso de cálculo, están disponibles los volúmenes de demanda ajustada y se utilizan en la determinación de ATS. Como se muestra en la **Tabla 22**, el efecto de zonas de no rebase es mayor cuando el flujo opuesto es bajo y cuando el flujo opuesto es mayor, el efecto disminuye a cero, ya que las zonas de rebase son irrelevantes cuando el flujo opuesto no permite ninguna oportunidad de paso. (Transportation Research Board, 2010)

2.2.8.3.5. Paso 5: Ajuste del volumen de demanda para determinar el Porcentaje de tiempo usado viajando en colas (PTSF)

De acuerdo al (Transportation Research Board, 2010) Este paso de cálculo se aplica sólo en los casos de carreteras de dos carriles Clase I y Clase II. El proceso de ajuste del volumen de la demanda para estimar el porcentaje de tiempo perdido en cola (*Percent Time Spent Following*) es estructuralmente similar al de la velocidad promedio de viaje (ATS). El enfoque general es el mismo, pero se utilizan diferentes factores de ajuste, y los flujos ajustados resultantes serán diferentes de los utilizados para el ATS.

La **Ecuación 11** y **Ecuación 12** son usadas para determinar porcentaje de flujo de demanda por el análisis del PTSF:

$$v_{i,PTSF} = \frac{V_i}{PHF \times f_{g,PTSF} \times f_{HV,PTSF}} \quad \text{Ecuación 11}$$

Dónde: $v_{i,PTSF}$ = Volumen de demanda ajustado para el cálculo de PTSF.

i = "d" (análisis en la dirección) y "o" (dirección opuesta);

$f_{g,PTSF}$ = Factor de ajuste por la pendiente para PTSF de la Tabla 23 o Tabla 24

$f_{HV,PTSF}$ = Factor de ajuste por vehículos pesados para PTSF, se determina mediante la Ecuación 12 con el uso de la Tabla 25 y Tabla 26

y, todas las demás variables están previamente definidas.

$$f_{HV,PTSF} = \frac{1}{1 + P_T(E_T - 1) + P_R(E_R - 1)} \quad \text{Ecuación 12}$$

2.2.8.3.5.1. Factor de ajuste por la pendiente para PTSF

Como en el caso del proceso de ajuste de velocidad promedio de viaje (ATS), los factores de ajuste por la pendiente se definen para los terrenos normales (planos u ondulados) y pendientes específicas de ascenso y descenso. En la Tabla 23 se encuentran los factores de ajuste para terrenos normales y pendientes en descenso (que se tratan como terreno plano). La Tabla 24 muestra los factores de ajuste para las pendientes en ascenso. Para determinar estos factores se utiliza la Tasa de flujo de una hora. (Transportation Research Board, 2010)

Tabla 23: Factor de ajuste por la pendiente en terreno general y descensos específicos para PTSF.

Volumen de demanda, V En una dirección (veh/h)	Factor de Ajuste Terreno Plano y Descensos específicos	
≤100	1.00	0.73
200	1.00	0.80
300	1.00	0.85
400	1.00	0.90
500	1.00	0.96
600	1.00	0.97
700	1.00	0.99
800	1.00	1.00
≥900	1.00	1.00

Fuente: (Transportation Research Board, 2010)

Tabla 24: Factor de ajuste por la pendiente en ascensos específicos para PTSF.

Pendiente%	Longitud de la pendiente (mi)	Volumen de demanda, V En una dirección (veh/h)								
		≤100	200	300	400	500	600	700	800	≥900
≥3 <3.5	0.25	1.00	0.99	0.97	0.96	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92
	0.50	1.00	0.99	0.98	0.97	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93
	0.75	1.00	0.99	0.98	0.97	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93
	1.00	1.00	0.99	0.98	0.97	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93
	1.50	1.00	0.99	0.98	0.97	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94
	2.00	1.00	0.99	0.98	0.98	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95
	3.00	1.00	1.00	0.99	0.99	0.97	0.97	0.97	0.96	0.96
	≥4.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.99	0.97	0.97
≥3.5 <4.5	0.25	1.00	0.99	0.98	0.97	0.94	0.93	0.93	0.92	0.92
	0.50	1.00	1.00	0.99	0.99	0.97	0.97	0.97	0.96	0.95
	0.75	1.00	1.00	0.99	0.99	0.97	0.97	0.97	0.96	0.96
	1.00	1.00	1.00	0.99	0.99	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97
	1.50	1.00	1.00	0.99	0.99	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97
	2.00	1.00	1.00	0.99	0.99	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98
	3.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	≥4.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
≥4.5 <5.5	0.25	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.99	0.97	0.97
	≥0.50	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
≥5.5	Todas	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

Fuente: (Transportation Research Board, 2010)

2.2.8.3.5.2. Factor de ajuste por vehículos pesados para PTSF

Para determinar el factor de ajuste por vehículos pesados para PTSF se utiliza la Ecuación 12. Se debe determinar el factor de equivalencia de vehículos ligeros para los vehículos pesados (E_T) y vehículos recreacionales (E_R). El factor de equivalencia en terreno plano, ondulado o descensos para vehículos pesados y recreativos se encuentran en la **Tabla 25**. En el cálculo del Porcentaje de tiempo usado viajando en colas (PTSF), no existe un procedimiento especial para camiones que viajan a una velocidad muy lenta por la presencia de pendientes de descenso especiales. (Transportation Research Board, 2010)

El factor de equivalencia de vehículos ligeros en ascensos se encuentra en la **Tabla 26**

Tabla 25: Factor de equivalencia de vehículos pesados (E_T) y recreacionales (E_R) para (PTSF) en terreno general y descensos específicos.

Tipo de vehículo	Demanda por dirección (Veh/h)	Tipo de Terreno	
		Plano y Descensos Específicos	Ondulado
Pesados (E_T)	≤ 100	1.1	1.9
	200	1.1	1.8
	300	1.1	1.7
	400	1.1	1.6
	500	1.0	1.4
	600	1.0	1.2
	700	1.0	1.0
	800	1.0	1.0
	≥ 900	1.0	1.0
Recreacionales (E_R)	Todos	1.0	1.0

Fuente: (Transportation Research Board, 2010)

Tabla 26: Factor de equivalencia de vehículos pesados (E_t) y recreacionales (E_r) para (PTSF) en ascensos específicos.

Pendiente %	Longitud de la pendiente (mi)	Volumen de demanda, V En una dirección (veh/h)								
		≤100	200	300	400	500	600	700	800	≥900
Vehículos Equivalentes para Vehículos Pesados (E_t)										
≥3 <3.5	≤2.00	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	3	1.5	1.3	1.3	1.2	1	1	1	1	1
	≥4.00	1.6	1.4	1.3	1.3	1	1	1	1	1
≥3.5 <4.5	≤1.00	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	1.5	1.1	1.1	1	1	1	1	1	1	1
	2	1.6	1.3	1	1	1	1	1	1	1
	3	1.8	1.4	1.1	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2
≥4.5 <5.5	≥4.00	2.1	1.9	1.8	1.7	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4
	≤1.00	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	1.5	1.1	1.1	1.1	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2
	2	1.7	1.6	1.6	1.6	1.5	1.4	1.4	1.3	1.3
	3	2.4	2.2	2.2	2.1	1.9	1.8	1.8	1.7	1.7
≥5.5 <6.5	≥4.00	3.5	3.1	2.9	2.7	2.1	2	2	1.8	1.8
	≤0.75	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	1	1	1	1.1	1.1	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2
	1.5	1.5	1.5	1.5	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6
	2	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.8	1.8
	3	3.4	3.2	3	2.9	2.4	2.3	2.3	1.9	1.9
≥6.5	≥4.00	4.5	4.1	3.9	3.7	2.9	2.7	2.6	2	2
	≤0.50	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	0.75	1	1	1	1	1.1	1.1	1.1	1	1
	1	1.3	1.3	1.3	1.4	1.4	1.5	1.5	1.4	1.4
	1.5	2.1	2.1	2.1	2.1	2	2	2	2	2
	2	2.9	2.8	2.7	2.7	2.4	2.4	2.3	2.3	2.3
	3	4.2	3.9	3.7	3.6	3	2.8	2.7	2.2	2.2
≥4.00	5	4.6	4.4	4.2	3.3	3.1	2.9	2.7	2.5	
Vehículos Equivalentes para Vehículos Recreacionales (E_r)										
Todos	Todos	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Fuente: (Transportation Research Board, 2010)

2.2.8.3.6. Paso 6 Cálculo del Porcentaje de tiempo usado viajando en colas PTSF.

De acuerdo al (Transportation Research Board, 2010) este paso sólo se aplica a las carreteras de dos carriles Clase I y Clase II. Las de clase III no utilizan este porcentaje para determinar los niveles de servicio.

Una vez que se calcula los flujos de demanda, el PTSF se calcula con la **Ecuación 13**:

$$PTSF_d = BPTSF_d + f_{np,PTSF} \left(\frac{v_{d,PTSF}}{v_{d,PTSF} + v_{o,PTSF}} \right) \quad \text{Ecuación 13}$$

Dónde: $PTSF_d$ = Porcentaje de tiempo usado viajando en colas en la dirección analizada (decimal)

$BPTSF_d$ = Base del Porcentaje de tiempo usado viajando en colas en la dirección analizada, de la Ecuación 21

$f_{np,PTSF}$ = Factor de ajuste por el porcentaje de zonas de no rebase en el tramo analizado para PTSF, de la Tabla 28

$v_{d,PTSF}$ = Volumen vehicular ajustado a la condiciones base en la dirección analizada para determinar PTSF(pc/h)

$v_{o,PTSF}$ = Volumen vehicular ajustado a la condiciones base en la dirección opuesta para determinar PTSF (pc / h)

La base del porcentaje de tiempo usado viajando en colas (Base Percent Time Spent Following, BPTSF) se calcula con la **Ecuación 14**:

$$BPTSF_d = 100[1 - \exp(-av_d^b)] \quad \text{Ecuación 14}$$

Donde a y b son constantes tomadas de la Tabla 27 y los demás términos ya han sido definidos.

La Tabla 27 y Tabla 28 se calcula con los flujos de demanda ya convertidos a vehículos de pasajeros por hora en las condiciones ideales (v_o y v_d)

Tabla 27: Coeficientes para determinar la base de PTSF

Volumen de demanda ajustado Opuesto, vo (vl/h)	Coefficiente a	Coefficiente b
≤200	-0.0014	0.973
400	-0.0022	0.923
600	-0.0033	0.87
800	-0.0045	0.833
1000	-0.0049	0.829
1200	-0.0054	0.825
1400	-0.0058	0.821
≥1600	-0.0062	0.817

Fuente: (Transportation Research Board, 2010)

Tabla 28: Factor de Ajuste por zona de no adelantamiento para PTSF

Volumen ajustado en ambos Sentidos = vd+vo (vl/h)	Porcentaje de zona de no adelantamiento					
	0	20	40	60	80	100
Distribución direccional = 50/50						
≤200	9	29.2	43.4	49.4	51	52.6
400	16.2	41	54.2	61.6	63.8	65.8
600	15.8	38.2	47.8	53.2	55.2	56.8
800	15.8	33.8	40.4	44	44.8	46.6
1,400	12.8	20	23.8	26.2	27.4	28.6
2,000	10	13.6	15.8	17.4	18.2	18.8
2,600	5.5	7.7	8.7	9.5	10.1	10.3
3,200	3.3	4.7	5.1	5.5	5.7	6.1
Distribución direccional = 60/40						
≤200	11	30.6	41	51.2	52.3	53.5
400	14.6	36.1	44.8	53.4	55	56.3
600	14.8	36.9	44	51.1	52.8	54.6
800	13.6	28.2	33.4	38.6	39.9	41.3
1,400	11.8	18.9	22.1	25.4	26.4	27.3
2,000	9.1	13.5	15.6	16	16.8	17.3
2,600	5.9	7.7	8.6	9.6	10	10.2
Distribución direccional = 70/30						
≤200	9.9	28.1	38	47.8	48.5	49
400	10.6	30.3	38.6	46.7	47.7	48.8
600	10.9	30.9	37.5	43.9	45.4	47
800	10.3	23.6	28.4	33.3	34.5	35.5
1,400	8	14.6	17.7	20.8	21.6	22.3
2,000	7.3	9.7	11.7	13.3	14	14.5
Distribución direccional = 80/20						
≤200	8.9	27.1	37.1	47	47.4	47.9
400	6.6	26.1	34.5	42.7	43.5	44.1
600	4	24.5	31.3	38.1	39.1	40
800	3.8	18.5	23.5	28.4	29.1	29.9
1,400	3.5	10.3	13.3	16.3	16.9	32.2
2,000	3.5	7	8.5	10.1	10.4	10.7
Distribución direccional = 90/10						
≤200	4.6	24.1	33.6	43.1	43.4	43.6
400	0	20.2	28.3	36.3	36.7	37
600	-3.1	16.8	23.5	30.1	30.6	31.1
800	-2.8	10.5	15.2	19.9	20.3	20.8
1,400	-1.2	5.5	8.3	11	11.5	11.9

Fuente: (Transportation Research Board, 2010)

Se debe tener en cuenta que en la **Tabla 28**, el factor de ajuste depende del flujo de demanda total de los dos carriles, aunque el factor se aplica a un solo análisis direccional. Este factor refleja no sólo el porcentaje de zonas de no adelantamiento en el tramo de análisis, sino también la distribución direccional de tráfico. La medida de la distribución direccional es la misma, independientemente de la dirección considerada. Así, por ejemplo, para relaciones de 70/30 y 30/70 resulta el mismo factor, todas otras variables son constantes. (Transportation Research Board, 2010)

2.2.8.3.7. Paso 7 Estimación del Porcentaje de velocidad a flujo libre (PFFS)

De acuerdo al (Transportation Research Board, 2010) Este paso sólo se utiliza en el análisis de carreteras de Clase III. El cálculo es sencillo, ya que tanto la velocidad a flujo libre (FFS) como la velocidad promedio de viaje (ATS) ya se han determinado en pasos previos. El porcentaje de velocidad a flujo libre (*Percent Free Flow Speed*) se estima a partir de la Ecuación 15:

$$PFFS = \frac{ATS_d}{FFS} \quad \text{Ecuación 15}$$

Donde todos sus términos están definidos previamente.

2.2.8.3.8. Paso 8: determinación de los Niveles de Servicio y la Capacidad.

Los criterios de niveles de servicio carreteras de dos carriles se muestran la Tabla 29

Tabla 29: Nivel de servicio en carreteras de dos carriles

Nivel de Servicio	Carreteras de Clase I		Carreteras de Clase II	Carreteras de Clase III
	ATS (mi/h)	PTSF (%)	PTSF (%)	PFFS (%)
A	> 55	≤ 35	≤ 40	>91.7
B	>50-55	>35-50	>40-55	>83.3-91.7
C	>45-50	>50-65	>55-70	>75.0-83.3
D	>40-45	>65-80	>70-85	>66.7-75.0
E	≤ 40	>80	>85	≤ 66.7

Fuente: (Transportation Research Board, 2010)

En este punto del análisis, los valores de cualquier medida de eficacia ya han sido determinados. El nivel de servicio se encuentra comparando las medidas apropiadas con los criterios de la Tabla 29.

- Clase I: Velocidad promedio (ATS) y Porcentaje de tiempo siguiendo PTSF;
- Clase II: Porcentaje de tiempo siguiendo (PTSF)

- Clase III: Porcentaje de velocidad a flujo libre (PFFS).

Para las Carreteras de Clase I, se aplican dos medidas de eficacia por lo cual cuando se utiliza la Tabla 29, se obtienen dos niveles de servicio, en este caso el peor de los dos es el prevalente. Por ejemplo, si el resultado con la velocidad promedio es un nivel de servicio C y con el porcentaje de tiempo siguiendo resulta un nivel de servicio D se asigna el nivel de servicio D. (Transportation Research Board, 2010)

2.2.8.3.8.1. Determinación de la Capacidad

La capacidad de las carreteras de dos carriles no se determina por una medida de la eficacia.

Para determinar la capacidad en las condiciones prevalentes, deben aplicarse los factores de ajuste pertinentes de la **Ecuación 7** y la **Ecuación 11**

En primer lugar, la capacidad se define como una tasa de flujo, por lo cual el PHF es 1.00 y se ajustan el Volumen de demanda para PTSF y para ATS, con estos datos nuevamente encontrados se utiliza la **Ecuación 16** o la **Ecuación 17** como se describe a continuación.

$$C_{dATS} = 1700f_{g,ATS}f_{HV,ATS} \quad \text{Ecuación 16}$$

Dónde: C_{dATS} = Capacidad en la dirección de análisis, bajo condiciones ideales de acuerdo a la velocidad promedio de viaje (ATS) (vl/h),

$$C_{dPTSF} = 1700f_{g,PTSF}f_{HV,PTSF} \quad \text{Ecuación 17}$$

Dónde: C_{dPTSF} = Capacidad en la dirección de análisis, bajo condiciones ideales de acuerdo al porcentaje de tiempo usado viajando en colas (PTSF) (vl/h).

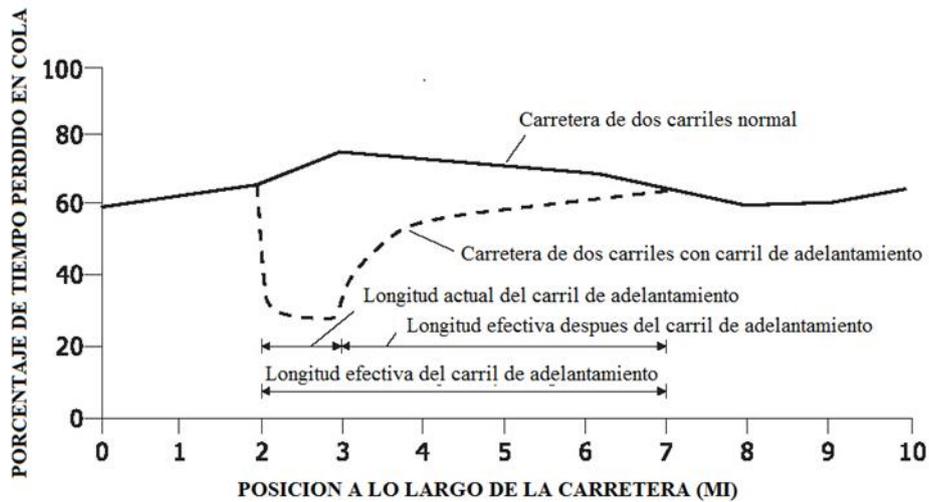
Para carreteras de Clase I, ambas capacidades deben ser analizadas. El valor más bajo representa la capacidad. Para carreteras de Clase II, la capacidad estará basada únicamente en el porcentaje de demoras siguiendo (PTSF). Para carreteras Clase III, la capacidad estará basada en la velocidad de desplazamiento promedio (ATS). (Transportation Research Board, 2010)

2.2.9. Metodología con carriles de adelantamiento

(Transportation Research Board, 2010) Indica que incorporar carriles de adelantamiento en una carretera de dos carriles mejora el rendimiento operativo y por lo tanto el nivel de servicio. La **Figura 33** Muestra el efecto operacional de un carril de adelantamiento en el Porcentaje de tiempo usado viajando en colas (PTSF). Se observan las ventajas operativas para una cierta distancia hasta que el porcentaje de demoras por seguimiento regresa a su nivel anterior, y se evidencia que la longitud efectiva de un carril de adelantamiento es superior a su longitud real.

La Tabla 30 muestra la longitud efectiva por el carril de adelantamiento para las medidas de eficacia ATS y PTSF. En el caso de ATS, el efecto se limita a 2.74 km(1,7 mi) en todos los casos. En lo que respecta PTSF, la longitud afectada puede llegar hasta 20.92 km(13 mi) para bajos flujos de demanda.

Figura 33: Efecto de un carril de adelantamiento



Fuente: (Transportation Research Board, 2010)

Tabla 30: Longitud afectada por carriles de adelantamiento

Tasa de Flujo Direccional vd(pc/h)	Longitud Efectiva Lde (mi)	
	PTSF	ATS
≤200	13	1.7
300	11.6	1.7
400	8.1	1.7
500	7.3	1.7
600	6.5	1.7
700	5.7	1.7
800	5	1.7
900	4.3	1.7
≥1000	3.3	1.7

Fuente: (Transportation Research Board, 2010)