

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



TESIS

**“IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE GESTIÓN DE
PAVIMENTOS PARA EL ÁREA DE MOVIMIENTO DE
AEROPUERTOS”**

PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO CIVIL

ELABORADO POR:

KAREN ANGELA CAMARENA CAMPOS

ASESOR

M.Sc. LEONARDO FLORES GONZÁLEZ

LIMA- PERÚ

2018

© 2018, Universidad Nacional de Ingeniería. Todos los derechos reservados

**“El autor autoriza a la UNI a reproducir la tesis en su totalidad o en parte,
con fines estrictamente académicos.”**

Camarena Campos Karen Angela

k.camarena.campos@gmail.com

997582402

A mi familia por su apoyo incondicional y, por inspirarme a ser mejor cada día.

ÍNDICE

ÍNDICE	1
RESUMEN	5
ABSTRACT	6
PRÓLOGO	7
LISTA DE TABLAS	8
LISTA DE FIGURAS	10
LISTA DE ECUACIONES	12
LISTA DE SÍMBOLOS Y SIGLAS	13
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN	14
1.1. GENERALIDADES	14
1.2. PROBLEMÁTICA	19
1.3. OBJETIVOS	20
1.3.1. Objetivo General	20
1.3.2. Objetivos Específicos	20
1.4. HIPÓTESIS	20
1.4.1. Hipótesis General	20
1.4.2. Hipótesis Específicas	21
1.5. VARIABLES	21
1.5.1. Variables Dependientes	21
1.5.2. Variables Independientes	21
CAPÍTULO II: FUNDAMENTO TEÓRICO	22
2.1. ESTADO DEL ARTE	22

2.2.	SISTEMA DE GESTIÓN DE PAVIMENTOS AEROPORTUARIOS	26
2.2.1.	Definición de términos	26
2.2.2.	Base de datos de un SGPA	28
2.2.3.	Funciones de un SGPA	29
2.2.4.	Beneficios de un SGPA	29
2.2.5.	Niveles de gestión	29
2.3.	ÍNDICE DE CONDICIÓN DE PAVIMENTOS (PCI)	31
2.3.1.	Herramientas	32
2.3.2.	Unidades de muestra	33
2.3.3.	Proceso de inspección	34
2.3.4.	Cálculo del PCI	35
2.4.	POLÍTICA DE MANTENIMIENTO Y REHABILITACIÓN (M&R)	39
2.4.1.	Actividades de M&R	40
2.4.2.	Tipos de falla	41
2.4.3.	Tratamientos aplicables	41
2.4.4.	Niveles de servicio	44
2.5.	MODELOS DE DETERIORO	44
2.5.1.	Cadenas de Markov	47
2.5.2.	Regresión logística	50
2.5.3.	Procedimiento de análisis de datos	51
	CAPÍTULO III: PRESENTACIÓN DE BASE DE DATOS	54
3.1.	INVENTARIO	55
3.2.	RED DE DRENAJE	56
3.3.	ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO	57
3.4.	HISTORIAL DE CONSTRUCCIÓN Y M&R	58
3.5.	CONDICIÓN DEL PAVIMENTO	58

3.6.	DATOS DE TRÁFICO	60
CAPÍTULO IV: APLICACIÓN DE MODELO NUMÉRICO CUANTITATIVO CON FINES DE GESTIÓN DE PAVIMENTOS EN AEROPUERTOS		62
4.1.	ANÁLISIS DE DATOS	62
4.2.	REGRESIÓN LOGÍSTICA DE LOS DATOS HISTÓRICOS	68
4.3.	MODELO NUMÉRICO CUANTITATIVO (CADENAS DE MARKOV)	72
CAPÍTULO V: VALIDACIÓN DE LA HIPÓTESIS		75
5.1.	PROPUESTA DE SISTEMA DE GESTIÓN DE PAVIMENTOS AEROPORTUARIOS	75
5.2.	VERIFICACIÓN DEL PRONÓSTICO	77
5.3.	COSTO vs ESTADO DE DETERIORO	79
5.4.	SITUACIÓN FUTURA CON Y SIN M&R	86
5.4.1.	Situación futura sin mantenimiento	86
5.4.2.	Situación futura con mantenimiento correctivo	87
5.4.3.	Situación futura con mantenimiento preventivo	88
5.5.	EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS	91
5.6.	PLAN DE M&R	97
CONCLUSIONES		100
RECOMENDACIONES		102
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		103
ANEXOS		106
Anexo 1.	Reporte de inspecciones PCI (2007, 2013, 2014 Y 2015)	106
Anexo 2.	Datos PCI (filtrado)	115
Anexo 3.	Cálculo del tamaño de la muestra	122
Anexo 4.	Test de normalidad Shapiro-wilk: Deterioro del pavimento	123

Anexo 5. Test de normalidad Shapiro-wilk: Inflación de precios	124
Anexo 6. Implementación de SGPA	125
Anexo 7. Plano de la red de pavimentos con fines de SGPA	126
APÉNDICES	127
Apéndice 1. Plano de ubicación y localización - Aeropuerto de Cajamarca	127
Apéndice 2. Análisis de precios unitarios de intervenciones de M&R	128

RESUMEN

En este trabajo se presentan los resultados de una investigación cuantitativa de alcances descriptivos y correlacionales, sobre una propuesta para la implementación de un Sistema de Gestión de Pavimentos Aeroportuarios (SGPA), en la que se desarrollará un modelo numérico cuantitativo aplicando cadenas de Markov para el modelado del deterioro del pavimento, donde el citado modelo relaciona la condición del pavimento (PCI) en función del tiempo (edad del pavimento).

En primera instancia, se recopiló información acerca de conceptos y estudios acerca de SGPA, metodología para la evaluación de la condición del pavimento, políticas de mantenimiento y rehabilitación (M&R), y modelos de deterioro.

Más adelante, se revisó los antecedentes históricos de construcción e inspección de los pavimentos de los principales aeropuertos del país y se elaboró una base de datos de la pista de aterrizaje (pavimento flexible) del Aeropuerto Mayor General FAP Armando Revoredo Iglesias - Cajamarca, dado la cantidad de información que se logró recopilar, para el desarrollo de un caso práctico.

Previo al desarrollo del modelo de Markov, se realizó un análisis de los valores PCI de las unidades de muestra de la pista de aterrizaje (reporte de las inspecciones históricas recopiladas), con fines de detección de valores atípicos para su eliminación o, corrección de ser el caso.

Luego de puntualizar la limitación de los datos históricos recopilados (cantidad), se calculó la matriz de probabilidades de transición (de las cadenas de Markov) a partir de un proceso numérico de regresión no lineal logística de los citados datos.

En la última parte del trabajo, se presenta la validación del modelo y la propuesta de SGPA, que incluye el pronóstico del comportamiento del pavimento para las situaciones con/sin M&R, la evaluación de alternativas y el plan de M&R.

Finalmente, se concluye que el SGPA permite programar las intervenciones a realizar en el pavimento, en base a los pronósticos de estado del modelo, que debe ser preciso y eficiente, por lo que emplear el modelo de Markov resulta adecuado.

ABSTRACT

This research work presents the results of a quantitative investigation with descriptive and correlative scopes, about a proposal for the implementation of an Airport Pavement Management System (SGPA), in which a quantitative numerical model will be developed applying Markov chains for the modeling of the pavement deterioration, where the said model relates the condition of the pavement (PCI) as a function of time (pavement age).

In first instance, information was collected on concepts and studies about SGPA, pavement condition assessment methodology, maintenance and rehabilitation (M&R) policies, and models of deterioration.

Later, the historical background of construction and inspection of the main airports pavements of the country was revised and, a runway (asphalt pavement) database of the Airport "Mayor General FAP Armando Revoredo Iglesias - Cajamarca" was elaborated, given the amount of information that was collected, for the development of a case study.

Prior to the development of the Markov model, an analysis was made of the PCI values of the runway sample units (historical inspection reports collected), with purposes of atypical values detection for their elimination or, correction if applicable.

After specifying the limitation of the collected historical data (quantity), the transition probabilities matrix (of the Markov chains) was calculated from a numerical non-linear logistic regression process of the mentioned data.

In the last part of the paper, model validation and SGPA proposal are presented, which includes the pavement behavior forecast for situations with/without M&R, the evaluation of alternatives and the M&R plan.

Finally, it is concluded that the SGPA allows to program the interventions to be performed on the pavement, based on the model state forecasts, which must be precise and efficient, so using the Markov model is appropriate.

PRÓLOGO

La parte fundamental y necesaria de la infraestructura aeroportuaria está en el área de movimiento (lado aire), donde se realizan las maniobras de aterrizaje y despegue. Por tanto, la seguridad operacional de las aeronaves depende del estado de conservación de los pavimentos del área de movimiento.

Es importante resaltar que, para hacer frente a los desastres naturales, como el ocurrido “fenómeno de El Niño costero”, el único medio de transporte de personas y de ayuda temprana a los miles de damnificados fue el transporte aéreo. De ahí la importancia de estudiar cómo se debe preservar la infraestructura a niveles de servicio adecuados, y de cómo el Estado Peruano viene distribuyendo los recursos.

El presente trabajo realiza una compilación bibliográfica, para establecer los pasos para implementar un SGPA, cuya finalidad es realizar las intervenciones de los pavimentos de manera preventiva y programada, más no en base a las necesidades inmediatas y sin una correcta planificación; dado que, se podría poner en riesgo la seguridad operacional.

El SGPA desarrollado en la investigación, tiene como herramienta principal el modelo numérico de Markov para predecir el comportamiento del pavimento. Evaluar cuánto mejora el estado del pavimento después de una intervención no es parte de la presente investigación, por la tanto es una limitación.

Finalmente, se propone una nueva investigación con data estructural y funcional para hacer más robusto el modelo de predicción propuesto, y continuar con el estudio de los SGPA en nuestro país.

Asesor

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Calificación PCI.....	31
Tabla 2. Cálculo del Valor de Reducción Corregido (VRC) – Pavimento AC	37
Tabla 3. Actividades de mantenimiento.....	40
Tabla 4. Deterioro en pavimentos AC (Descripción, causa y medida de corrección).....	42
Tabla 5. Interpretación de la calificación PCI.	43
Tabla 6. Niveles de servicio para pavimentos AC de aeropuertos.	44
Tabla 7. Estados del pavimento – Proceso de Markov.....	48
Tabla 8. Estructura de la pista de aterrizaje año 2017 (material y espesor)	57
Tabla 9. Estructura de la pista de aterrizaje año 2003 (material y espesor)	58
Tabla 10. Tabla resumen de PCI por sección	60
Tabla 11. Resumen de las operaciones del año 2016.....	61
Tabla 12. Proyección de operaciones 2017-2034.....	61
Tabla 13. Identificación de valores atípicos PCI 2007	64
Tabla 14. Identificación de valores atípicos PCI 2013	64
Tabla 15. Identificación de valores atípicos PCI 2014	65
Tabla 16. Identificación de valores atípicos PCI 2015	65
Tabla 17. PCI 2013 sin valores atípicos	66
Tabla 18. PCI 2014 sin valores atípicos	66
Tabla 19. PCI 2015 sin valores atípicos	67
Tabla 20. Tabla resumen de PCI por sección, después de análisis de datos.....	67
Tabla 21. Datos - Herramienta Solver	69
Tabla 22. Vectores de estado y PCI obtenidos con modelo numérico	73
Tabla 23. Probabilidad de que el pavimento cambie o se mantenga en su estado.....	74

Tabla 24. PCI - Pista de aterrizaje del Aeropuerto de Cajamarca.....	77
Tabla 25. Costos de intervenciones de mantenimiento en pavimentos.	79
Tabla 26. Análisis de UM para los distintos estados de deterioro.	80
Tabla 27. Costo de intervención de M&R por metro cuadrado.....	84
Tabla 28. Costos de tratamientos / intervenciones para un pavimento en Perú. 85	
Tabla 29. Reporte de Inflación del Banco Central de Reserva del Perú (BCRP) - Setiembre 2017.....	91
Tabla 30. Presupuesto estimado sin mantenimiento	92
Tabla 31. Presupuesto estimado con mantenimiento correctivo	93
Tabla 32. Presupuesto estimado con mantenimiento preventivo	94
Tabla 33. Análisis de alternativas	95
Tabla 34. Anexo 1 – PCI 2007 Pista de aterrizaje, Aeropuerto de Cajamarca .	106
Tabla 35. Anexo 1 – PCI 2013 Pista de aterrizaje, Aeropuerto de Cajamarca .	109
Tabla 36. Anexo 1 – PCI 2014 Pista de aterrizaje, Aeropuerto de Cajamarca .	111
Tabla 37. Anexo 1 – PCI 2015 Pista de aterrizaje, Aeropuerto de Cajamarca .	113
Tabla 38. Anexo 2 – PCI 2013 (filtrado) Pista de aterrizaje, Aeropuerto de Cajamarca.....	115
Tabla 39. Anexo 2 – PCI 2014 (filtrado) Pista de aterrizaje, Aeropuerto de Cajamarca.....	117
Tabla 40. Anexo 2 – PCI 2015 (filtrado) Pista de aterrizaje, Aeropuerto de Cajamarca.....	119

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Campos de Vuelo Clasificados en Nacional/Internacional/Otros - Perú.....	16
Figura 2. Aeropuertos Internacionales - Perú	17
Figura 3. Aeropuertos Nacionales - Perú	18
Figura 4. Distribución por edad de los SGPA en EEUU.	22
Figura 5. División de la red del pavimento	27
Figura 6. Ejemplo de hoja de datos para inspecciones de condición de pavimento AC.....	32
Figura 7. Ejemplo de hoja de datos para inspecciones de condición de pavimento PCC.....	33
Figura 8. Ejemplo de hoja de datos para inspección de pavimento AC.....	35
Figura 9. Curva de reducción – Falla tipo 12 (Peladura)	36
Figura 10. Curva de corrección de VR	37
Figura 11. Costo en PCI vs Tiempo	39
Figura 12. Curva de predicción de la condición del pavimento (ejemplo)	45
Figura 13. Diagrama de flujo del proceso de modelamiento	47
Figura 14. Función logística - Representación gráfica (PCI vs tiempo)	50
Figura 15. Diagrama de flujo del proceso de preselección de datos.....	52
Figura 16. Diagrama de caja – Valores atípicos PCI	53
Figura 17. Línea de tiempo - Aeropuerto de Cajamarca.....	54
Figura 18. Imagen del plano - pista de aterrizaje, Aeropuerto de Cajamarca.....	55
Figura 19. Sectorización - Pista de aterrizaje del Aeropuerto de Cajamarca.....	57
Figura 20. Fallas - Pista de aterrizaje del Aeropuerto de Cajamarca.....	59
Figura 21. Fallas - Pista de aterrizaje del Aeropuerto de Cajamarca.....	59
Figura 22. Diagrama de flujo del proceso de preselección de datos.....	62
Figura 23. Diagrama de caja – Valores atípicos PCI	63

Figura 24. PCI vs Edad - Pista de aterrizaje del Aeropuerto de Cajamarca	70
Figura 25. PCI vs Edad (corregida)- Pista de aterrizaje del Aeropuerto de Cajamarca.....	71
Figura 26. PCI vs Edad – Datos obtenidos del modelo	74
Figura 27. Propuesta sin SGPA.....	75
Figura 28. Propuesta con SGPA (ver detalle en Anexo 6)	76
Figura 29. PCI vs Edad – Costos asociados M&R.....	85
Figura 30. PCI vs Edad – Sin mantenimiento	86
Figura 31. PCI vs Edad – Con mantenimiento correctivo	88
Figura 32. PCI vs Edad – Con mantenimiento preventivo	89
Figura 33. PCI vs Edad – Otras alternativas con mantenimiento preventivo	90
Figura 34. Análisis de alternativas - Costo.....	95
Figura 35. Análisis de alternativas – Nivel de servicio	96
Figura 36. Programación de inversiones – Plan de M&R	98
Figura 37. SGPA- Mantenimiento recomendado	99

LISTA DE ECUACIONES

Ec. 1. Ecuación para cálculo del número máximos de fallas	37
Ec. 2. Ecuación para cálculo del PCI de la unidad de muestra	38
Ec. 3. Ecuación para cálculo del PCI de la sección	38
Ec. 4. Vector de estado para el ciclo de servicio “i”	48
Ec. 5. Vector de estado para el ciclo de servicio “0”	48
Ec. 6. Matriz de Probabilidades de Transición	49
Ec. 7. Cálculo de vectores de estado	49
Ec. 8. Función logística - Representación matemática	50
Ec. 9. Función logística PCI(t) - Representación matemática	51
Ec. 10. Función logística - Representación matemática	68
Ec. 11. Función logística obtenida con solver	70
Ec. 12. Vector de estado para el ciclo de servicio “0”	72
Ec. 13. Cálculo de vectores de estado	72
Ec. 14. Matriz de Probabilidades de Transición con fines de SGPA	72
Ec. 15. Vector de estado para el ciclo de servicio “4”	77
Ec. 16. Fórmula general para cálculo del tamaño de muestra	122

LISTA DE SÍMBOLOS Y SIGLAS

ACRP	:	Airport Cooperative Research Program
AIP	:	Publicación de Información Aeronáutica
AC	:	Concreto Asfáltico
CORPAC	:	Corporación Peruana de Aeropuertos y Aviación Comercial
DGAC	:	Dirección General de Aeronáutica Civil del Perú
FAA	:	Federal Aviation Administration
FOD	:	Foreign object damage (Daños por objetos extraños)
MPT	:	Matriz de Probabilidades de Transición
M&R	:	Mantenimiento y rehabilitación
OACI	:	Organización de Aviación Civil Internacional
PMD	:	Peso máximo de despegue de la aeronave
PCC	:	Concreto de Cemento Portland
PCI	:	Pavement Condition Index
RWY	:	Pista de aterrizaje (Runway)
SGPA	:	Sistema de Gestión de Pavimentos Aeroportuarios
UM	:	Unidad de Muestra
VR	:	Valor de Reducción
VR	:	Valor de Reducción Corregido
(L)	:	Severidad de falla baja (Low)
(M)	:	Severidad de falla media (Medium)
(H)	:	Severidad de falla alta (High)

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1. GENERALIDADES

Se sabe que, el deterioro del pavimento es afectado por distintos factores tales como las condiciones ambientales, condición superficial, condición estructural, cambios en el tráfico operacional, etc. [FAA, 2014 b].

En tal sentido, el mantenimiento y rehabilitación (M&R) de los pavimentos aeroportuarios se debe realizar de manera preventiva y programada, más no en base a las necesidades inmediatas y sin una correcta planificación; dado que, se podría poner en riesgo la seguridad operacional y resulta en una gestión ineficiente de los recursos económicos disponibles [FAA, 2014 a].

Es así que, la implementación de sistemas de gestión de pavimentos aeroportuarios (SGPA) se viene realizando hace más de dos décadas alrededor del mundo, como es el caso de EEUU, que en la encuesta realizada por el “Airport Cooperative Research Program” (ACRP) en el año 2009, presentó como resultado que más del 60 % de todos los aeropuertos de dicho estado, tenían un diseño funcional de gestión de pavimentos con un tiempo promedio de 9 años y un 23 % se encontraba en un proceso de implementación del mismo [Hajek et al., 2011].

Asimismo, un análisis de distintas bases de datos de sistemas de gestión de pavimentos aeroportuarios en EEUU, han mostrado una paulatina pero estable mejora en las condiciones de la infraestructura aeroportuaria desde el año 1985, año en que se inició con la implementación de los SGPA en dicho país [Tighe y Covalt, 2008].

En tal sentido, viene la pregunta ¿en qué consiste un sistema de gestión de pavimentos aeroportuarios?

Al respecto, tenemos definiciones generales de la gestión de pavimentos como un conjunto de actividades que tienen como objetivo conservar por un período de tiempo las condiciones de seguridad, comodidad y capacidad estructural adecuadas para la circulación, minimizando los costos que esto implica [Solminihac, 2005].

La gestión de pavimentos cuantifica información y provee de recomendaciones específicas para mantener el pavimento en un adecuado nivel de servicio mientras se minimiza los gastos relacionados al M&R de la infraestructura; es decir, brinda herramientas para la toma de decisiones, mediante procesos sistemáticos y objetivos, que establecen prioridades, y permiten realizar una programación con estrategias viables y económicas, asignando los recursos necesarios para las intervenciones en los pavimentos [Tighe y Covalt, 2008].

Un sistema de gestión de pavimentos aeroportuarios consiste en el establecimiento de procesos sistemáticos y objetivos, que permitan mantener un adecuado nivel de servicio del pavimento durante su ciclo de vida útil, garantizando operaciones seguras de las aeronaves y la optimización de recursos [Hajek et al., 2011]. Se fundamenta en una base de almacenamiento de datos, una metodología para evaluar el deterioro del pavimento, estrategias para tratar los diversos tipos de deterioro, programación de evaluaciones periódicas de los pavimentos y un modelo capaz de predecir el comportamiento del pavimento [FAA, 2014 a].

A la fecha de estudio, el Perú cuenta con 141 campos de vuelo (ver Figura 1), entre ellos 11 Aeropuertos internacionales (ver Figura 2) y 23 aeropuertos nacionales (ver Figura 3); de los cuales, ninguno cuenta con un SGPA implementado [DGAC, 2017].

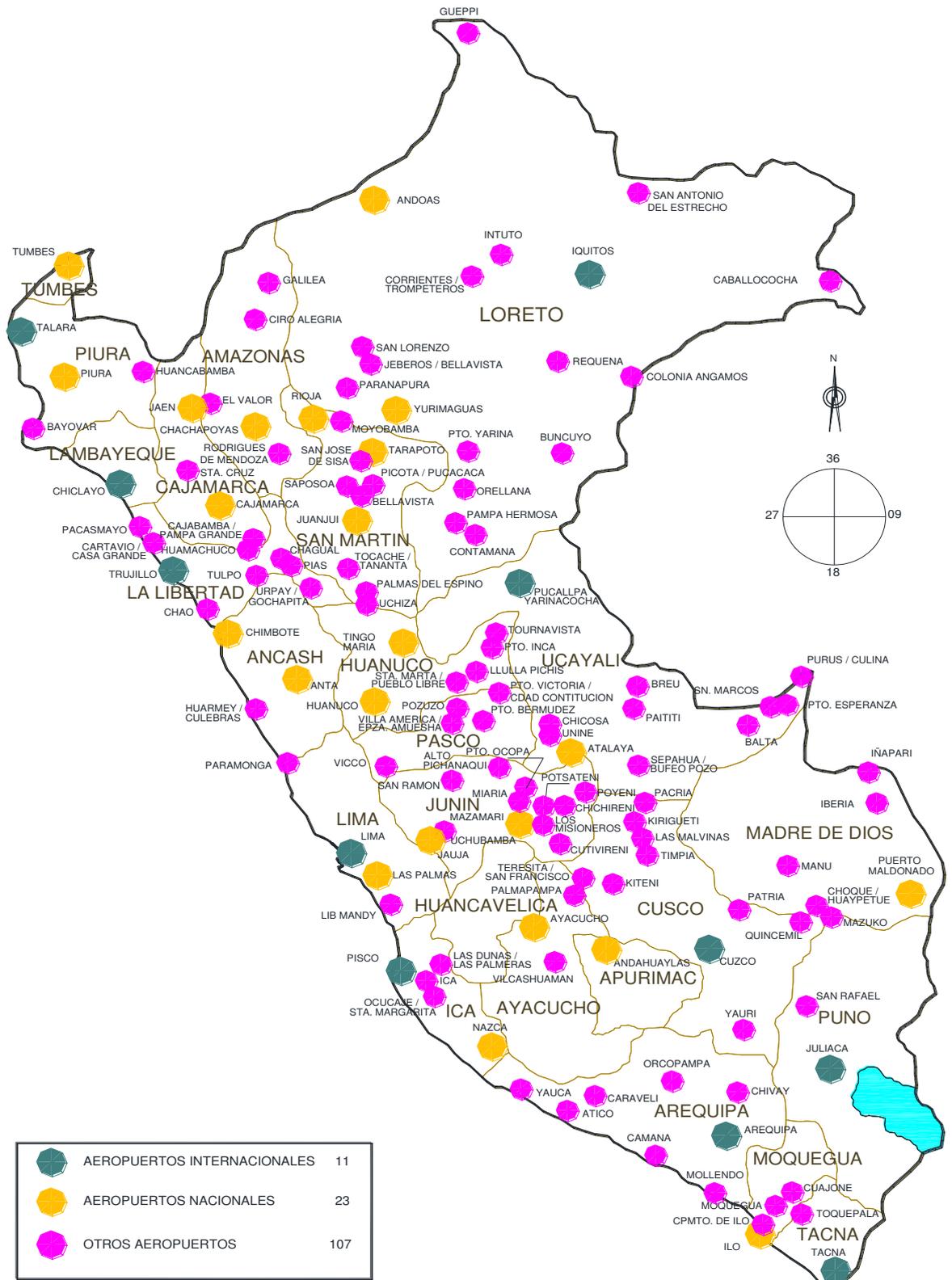


Figura 1. Campos de Vuelo Clasificados en Nacional/Internacional/Otros - Perú

Fuente: DGAC



Figura 2. Aeropuertos Internacionales - Perú
Fuente: DGAC



Figura 3. Aeropuertos Nacionales - Perú

Fuente: DGAC

1.2. PROBLEMÁTICA

Según consta en la base de datos de la Dirección General de Aeronáutica Civil del Ministerio de Transportes y Comunicaciones, al mes de octubre del 2017, el Estado Peruano viene promoviendo el transporte aéreo ya sea mediante concesiones de aeropuertos (Aeropuerto Jorge Chávez - Lima en el año 2001; Aeropuertos de Chiclayo, Tumbes, Talara, Iquitos, Tarapoto, Chachapoyas, Pisco, Trujillo, Anta-Huaraz, Piura en el año 2006 y Aeropuertos de Puerto Maldonado, Arequipa, Tacna, Andahuaylas en el 2011), ampliaciones de Aeropuertos (ej. Aeropuerto de Jauja en el 2016) y la construcción del nuevo Aeropuerto Internacional de Chinchero – Cusco.

Sin embargo, muchos de los mencionados aeropuertos presentan condiciones precarias en la infraestructura aeroportuaria (pista de aterrizaje), tal es el caso del aeropuerto de Talara que requiere una total reconstrucción de la estructura del pavimento de la pista de aterrizaje; o los aeropuertos de Piura y Chiclayo, que cuentan con expediente técnico aprobado para proyectos de “Mejoramiento de sistema de pistas” [DGAC, 2017].

En tal sentido, se tiene que la evaluación de las condiciones existentes de los pavimentos aeroportuarios, se realiza con la finalidad encontrar la mejor solución a un problema existente y, no se investiga con la finalidad de obtener una estrategia que considere el comportamiento futuro del pavimento [FAA, 2014 a]. En consecuencia, no existe una base de datos que permita generar retroalimentación, conocer el comportamiento del pavimento y planificar intervenciones de M&R, que conserven la infraestructura en un nivel de servicio adecuado, garantizando la seguridad operacional de las aeronaves durante el tiempo de vida de diseño del pavimento y, el tiempo que la misma pueda ser extendida.

¿Qué se requiere para garantizar un adecuado nivel de servicio de los pavimentos del área de movimiento de los aeropuertos del Perú, durante su ciclo de vida útil y los años que esta pueda ser extendida?

Implementar un SGPA, cuyo modelo de predicción de estado del pavimento, herramienta principal del sistema, sea desarrollado y calibrado para las condiciones específicas a los que es sometido y causan deterioro (tráfico operacional, condiciones ambientales, etc.).

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo General

- Proponer un plan de M&R que garantice cumplir con el ciclo de vida de diseño de un pavimento*, preservando un adecuado nivel de servicio.

(*) El caso aplicativo a desarrollar consiste en un pavimento de tipo flexible.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Proponer evaluaciones periódicas de pavimentos con fines de M&R y generar una base de datos para un SGPA.
- Aplicar un procedimiento numérico cuantitativo que permita predecir la condición del pavimento y, realizar un diagnóstico considerando mantenimiento y sin considerar mantenimiento.
- Analizar en qué medida se prolonga y mantiene el nivel de servicio para distintas alternativas de M&R

1.4. HIPÓTESIS

1.4.1. Hipótesis General

- La implementación de un SGPA, cuyo modelo de predicción es calibrado para las condiciones específicas a las que es sometido el pavimento caso de estudio, permite identificar el momento de intervención oportuna, con la finalidad de prevenir mayores daños y garantizar la seguridad operacional.

La hipótesis será validada mediante el desarrollo y calibración de un modelo numérico cuantitativo de predicción de condición del pavimento, de un aeropuerto del Perú, y el pronóstico del comportamiento del pavimento para situaciones con/sin M&R.

1.4.2. Hipótesis Específicas

- El estado futuro de la condición del pavimento de una estructura determinada (material y espesor), sometido a distintos factores que causan deterioro como el tráfico y condiciones ambientales, se puede predecir mediante un modelo numérico cuantitativo.
- Los costos asociados a estrategias de M&R varían considerablemente para una condición del pavimento satisfactoria comparado con una condición seria o de falla.
- El desarrollo de un programa de mantenimiento garantiza un adecuado nivel de servicio durante el ciclo de vida del pavimento y los años que esta pueda ser extendida.

1.5. VARIABLES

1.5.1. Variables Dependientes

- Deterioro del pavimento : "PCI"
- Vida útil del pavimento : "años"

1.5.2. Variables Independientes

- Ciclos de servicio (tiempo) : "años"
- Costos de tratamientos M&R : "\$/m²"
- Tipos de falla **
 - ✓ Bacheos : "m²"
 - ✓ Grietas long. y transv. : "m"
 - ✓ Peladura : "m²"

(**) Fallas predominantes del caso aplicativo a desarrollar.

CAPÍTULO II: FUNDAMENTO TEÓRICO

2.1. ESTADO DEL ARTE

El desarrollo de un sistema de gestión de pavimentos aeroportuario, permite mantener un adecuado nivel de servicio del pavimento durante su ciclo de vida útil, garantizando operaciones seguras de las aeronaves y la optimización de recursos, todo esto mediante una adecuada programación de mantenimiento y rehabilitación (M&R) de los pavimentos [Hajek et al., 2011]

El M&R de los pavimentos aeroportuarios ha sido de interés especial para los sectores académicos y transportes por muchos años, tal es así que EEUU viene implementando los SGPA desde el año 1985, de los cuales ninguno reporta su SGPA como poco útil, al contrario, reportan mejoras en las condiciones de la infraestructura aeroportuaria y en la administración de recursos [Tighe y Covalt, 2008].

La distribución de antigüedad de los aeropuertos que vienen empleando un SGPA en EEUU es mostrado en la Figura 4.

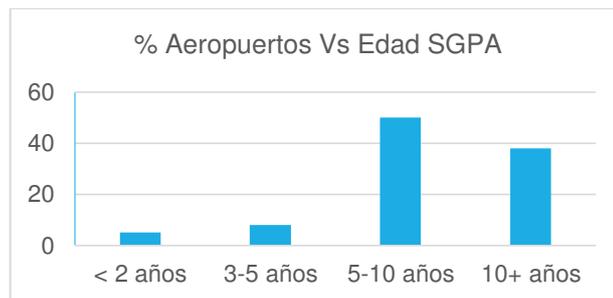


Figura 4. Distribución por edad de los SGPA en EEUU.

Fuente: [Hajek et al., 2011]

En los últimos años ha aumentado el número de investigaciones relacionadas con la evaluación del comportamiento del pavimento durante su vida útil, sin embargo, debido a que el deterioro del pavimento es afectado por distintos factores tales como las condiciones ambientales, condición superficial, condición estructural, el tráfico operacional, etc. [FAA, 2014 b]; compete el desarrollo de un modelo de deterioro que corresponda con las condiciones del pavimento en estudio.

Resultados de análisis y estudios previos, como el realizado por Nuñez y Shahin en el año 1986, hasta los más recientes, como los realizados por la Federal Aviation Administration (FAA) en el año 2014, han demostrado que la condición superficial del pavimento está relacionado con el paso del tiempo (edad), y que no se puede encontrar una correlación importante con otras variables, a pesar de que se estudiaron los pavimentos por separado según su funcionalidad, por ejemplo, las pistas de aterrizaje y plataformas de estacionamiento no se combinaron en un mismo análisis. Estos autores utilizaron el “Pavement Condition Index” (PCI), de la ASTM D5340 “Standard Test Method for Airport Pavement Condition Index Surveys”, como indicador de la condición superficial del pavimento.

La ASTM D5340, califica el estado del pavimento con el PCI, cuyo valor corresponde al rango de 0 a 100. La citada norma establece que un pavimento inicia su ciclo de vida en perfectas condiciones (PCI=100) y después de ser sometido a ciclos de servicio, que causan el deterioro del pavimento, puede llegar a un estado colapsado (PCI=0).

La FAA en su circular de asesoramiento: “Airport Pavement Management Program” (2014), describe el SGPA, sus principales componentes y la manera en que es empleado para la programación de M&R del pavimento. Asimismo, señala que un SGPA requiere un modelo de deterioro preciso y eficiente, capaz de predecir la condición futura del pavimento basado en los datos obtenidos de las inspecciones periódicas (PCI). Sin embargo, no incluye en su publicación el procedimiento para desarrollo de modelos de deterioro del pavimento.

Solminihac (2005) sintetiza y describe los denominados modelos de deterioro empleados en la gestión de pavimentos. Uno de los modelos que considera los parámetros mencionados anteriormente (PCI y edad del pavimento), es el modelo probabilístico de Markov. No obstante, el autor no profundiza en los métodos para el desarrollo del citado modelo.

Butt et al. (1994) define el modelo probabilístico de Markov, como un modelo capaz de describir los cambios de la condición de pavimento de un período a otro, a través de la denominada matriz de probabilidades de transición (MPT).

Solorio et al. (2014) en su publicación técnica para el Instituto Mexicano del Transporte, presenta los resultados de una investigación bibliográfica sobre la aplicación de métodos markovianos en los modelos de deterioro del pavimento,

en la que explica (entre otros) los métodos alternativos para obtener la MPT a partir de datos históricos. En general, estos métodos se basan en establecer funciones objetivo que buscan minimizar las diferencias entre los valores observados y los que se predicen mediante la MPT.

Tighe y Covalt en su estudio realizado en el año 2008, formulan recomendaciones para la implementación de un SGPA y resaltan que, el constante respaldo y actualización de datos es fundamental para dar continuidad a la gestión una vez realizada la implementación del SGPA, dado que, permite generar una retroalimentación en el sistema y actualizar los planes de M&R. Sin embargo, no exponen sobre los métodos de M&R y la influencia de los mismos en el comportamiento del pavimento.

Existen diversas publicaciones que proveen información técnica sobre los procedimientos de evaluación de la condición de pavimentos y selección de tratamientos de M&R. Tales como, FAA Advisory Circular N° 150/5380-6C "Guidelines and Procedures for Maintenance of Airport Pavements" (2014), ACRP "Common Airport Pavement Maintenance Practices" (2011), ACRP "Pavement Maintenance Guidelines for General Aviation Airport Management" (2016), entre otros.

Asimismo, existen organizaciones internacionales orientadas a intercambiar experiencias y conocimientos para que las operaciones aeronáuticas y aeroportuarias se desarrollen en el marco adecuado de seguridad, regularidad y eficiencia; tales como, la Asociación Latino Americana y Caribeña de Pavimentos Aeroportuarios (ALACPA), que en cumplimiento de sus principales objetivos, desarrolla Seminarios de Pavimentos Aeroportuarios y de Gestión de los Pavimentos del Área de Movimiento, de los cuales, se obtuvo fuentes de consulta actualizadas, y se conoció la experiencia de otros aeropuertos que han implementado un SGPA.

De la revisión bibliográfica realizada, se aprecia que el PCI es el indicador numérico que califica el estado del pavimento y está estrechamente relacionado con la edad del pavimento, los cuales son de utilidad para el desarrollo de los modelos de deterioro, que son herramientas esenciales predecir el comportamiento del pavimento y realizar un programa de M&R que mantenga el pavimento en un nivel de servicio adecuado.

Por lo tanto, el presente trabajo tiene por objetivo el desarrollo de un modelo numérico cuantitativo que describa el comportamiento del pavimento a través del tiempo, y que permita predecir la condición futura del mismo, el cual será calibrado con datos obtenidos de un proceso numérico de regresión logística de datos históricos de los pavimentos de un aeropuerto del Perú.

La investigación, plantea como hipótesis que la implementación de un SGPA, cuyo modelo de predicción sea calibrado para las condiciones específicas del pavimento en estudio, permite identificar el momento intervención oportuna, con la finalidad de prevenir mayores daños y garantizar la seguridad operacional, manteniendo un adecuado nivel de servicio durante su ciclo de vida útil y los años que esta pueda ser extendida.

2.2. SISTEMA DE GESTIÓN DE PAVIMENTOS AEROPORTUARIOS

Un sistema de gestión de pavimentos provee las herramientas necesarias para predecir el comportamiento pavimento e identificar el tiempo óptimo para intervenir con actividades de mantenimiento y rehabilitación (M&R) [Zimmerman, 1995]. Es decir, brinda soporte para una adecuada programación de M&R de los pavimentos, con la finalidad de mantener un adecuado nivel de servicio de la infraestructura durante su ciclo de vida útil, garantizando operaciones seguras de las aeronaves y la optimización de recursos [Hajek et al., 2011].

La implementación de un SGPA consiste en las siguientes actividades [Tighe y Covalt, 2008]:

- Inspecciones periódicas de la condición del pavimento.
- Recolección y análisis datos.
- Identificar las necesidades de M&R.
- Evaluación y selección de estrategias de M&R apropiadas para satisfacer las necesidades.

A continuación, se describen los componentes, características, funciones y beneficios de un SGPA, así como, los pasos básicos necesarios para implementar un SGPA.

La principal referencia técnica para el desarrollo de los citados ítems es [FAA, 2014 a].

2.2.1. Definición de términos

A continuación, se definen los términos requeridos para explicar la gestión de pavimentos [FAA, 2014 a], (ver Figura 5):

- a. Red: Representa la totalidad de la infraestructura de pavimentos del área de movimiento de un aeropuerto.
- b. Rama o componente: Es una parte de la red que sirve para un propósito específico (pistas de aterrizaje, calles de rodaje, plataformas, etc.). Por

ejemplo, cada pista de aterrizaje de un aeropuerto se considera una rama/componente.

- c. Sección: Área cuya estructura del pavimento, tipo, edad, condición, cargas de tráfico, historial de construcción y M&R, función e instalaciones de drenaje son uniformes. Cada rama consiste como mínimo en una sección, que es la unidad básica de reparación.
- d. Unidad de muestra: Es una parte de la sección utilizada para determinar el estado superficial del pavimento, siguiendo los lineamientos establecidos en la norma ASTM D5340.



Figura 5. División de la red del pavimento

Fuente: Elaboración propia

2.2.2. Base de datos de un SGPA

Los elementos esenciales a considerar para realizar una adecuada programación de M&R de los pavimentos son: inventario de los pavimentos, estructura del pavimento, historial de M&R (incluido costos), documentación de inspecciones a la condición del pavimento y datos de tráfico.

- a. Inventario de los pavimentos: Consiste en datos de localización de las pistas de aterrizaje, calles de rodaje y plataformas de estacionamiento; así como, sus dimensiones y tipo de pavimento.
- b. Estructura del pavimento: Consiste en información de la composición estructural del pavimento (material y espesor), tomando en cuenta la estructura de la construcción inicial, posteriores rehabilitaciones y/o recrecidos, etc. Si no se encuentra disponible dicha información, resulta necesario realizar ensayos destructivos / no destructivos para determinar la composición estructural del pavimento existente.
- c. Historial de construcción y M&R: Se basa en información de las intervenciones realizadas a los pavimentos (M&R) desde la fecha de su construcción. Así como, recopilación de los costos asociados a las actividades de M&R.
- d. Condición del pavimento: Es un componente fundamental del SGPA, consiste en un proceso objetivo, sistemático y repetitivo de la evaluación de la condición del pavimento. Un indicador numérico como el "Pavement Condition Index" (PCI), de la ASTM D5340, califica el estado del pavimento, y la toma de datos periódica del mismo es esencial para poder modelizar el deterioro del pavimento a través del tiempo, y determinar el momento idóneo para realizar intervenciones de M&R.
- e. Datos de tráfico: Consiste en información del número de operaciones actuales y las proyectadas a futuro (cantidad de operaciones y tipo de aeronave), que son necesarios para analizar las posibles causas del deterioro y proponer adecuadas alternativas M&R.

2.2.3. Funciones de un SGPA

- Predecir la condición futura del pavimento.
- Identificar dónde y cuándo es necesario intervenir con actividades de M&R, proporcionando un plan óptimo de M&R.
- Determinar el presupuesto requerido para cumplir los objetivos de la gestión, tales como el mantenimiento de pavimentos dependiendo de una condición dada o la eliminación requerimientos de rehabilitación a largo de los años.
- Establecer prioridades considerando un presupuesto asignado a las actividades de M&R, permitiendo pasar de un plan de M&R óptimo a un plan ejecutable.

2.2.4. Beneficios de un SGPA

- Proporciona una objetiva y consistente evaluación del estado de los pavimentos de un aeropuerto.
- Proporciona un sustento documentado para determinar las necesidades de M&R.
- Determina el presupuesto para mantener los pavimentos al nivel de servicio requerido.
- Proporciona información del estado presente y futuro de los pavimentos del aeropuerto.
- Determina los costos para distintas alternativas de M&R.
- Identifica el impacto de no realizar reparaciones en los pavimentos.

2.2.5. Niveles de gestión

Un sistema de gestión de pavimentos opera a diferentes niveles de gestión (nivel de red y nivel de proyecto), cada nivel tiene necesidades particulares en cuanto a tipo y cantidad de información, considera distintos criterios para establecer prioridades y tienen distintas limitaciones [Solminihaç, 2005].

A continuación, se describen los niveles de gestión:

a. Gestión a nivel de red

En la gestión a nivel de red se tiene en cuenta el estado general de la red de pavimentos (actual y futura) y el presupuesto requerido a corto y largo plazo. Se emplea para optimizar la asignación de recursos y realizar un programa de M&R estableciendo prioridades.

El nivel de inspección utilizado es este tipo de evaluación es generalmente básico, consiste en una inspección superficial (PCI) de las secciones de pavimento contenidas en la red [Tighe y Covalt, 2008].

Consiste en:

- Sectorización de los pavimentos, toma de datos (deterioro, tráfico, costos y otros).
- Establecer criterios de conservación, como la condición de servicio mínimo aceptable del pavimento.
- Aplicación de modelos de deterioro.
- Evaluación de alternativas de M&R, considerando restricciones de presupuesto.
- Desarrollo de planes de conservación y planes de trabajo a futuro.

b. Gestión a nivel de proyecto

En la gestión a nivel de proyecto las decisiones se toman en base a la optimización de recursos durante el ciclo de vida del pavimento. Este nivel de gestión es específico para un componente de la red de pavimento que ha sido identificada para una intervención mayor, el cual requiere un estudio detallado del estado del pavimento, con ensayos suplementarios como deflectometría, fricción, rugosidad, etc. [Tighe y Covalt, 2008].

Consiste en:

- Toma de datos de campo y laboratorio.

- Análisis técnico y económico de las alternativas de M&R para el proyecto.
- Selección de la mejor alternativa de M&R detallando la programación, los costos, etc.
- Implementación del programa de M&R.

2.3. ÍNDICE DE CONDICIÓN DE PAVIMENTOS (PCI)

El “Pavement Condition Index” (PCI) es un indicador numérico que, basado en las fallas observadas en la superficie del pavimento, da una calificación de la condición superficial del pavimento [ASTM D5340, 2013].

El valor del PCI fluctúa entre 0 (colapsado) y 100 (bueno), en la Tabla 1 se muestra la denominación para los diversos rangos de valores de PCI.

Tabla 1. Calificación PCI.
 Fuente: [ASTM D5340, 2013]

CALIFICACIÓN PCI	
86 - 100	BUENO
71 - 85	SATISFACTORIO
56 - 70	ACEPTABLE
41 - 55	POBRE
26 - 40	MUY POBRE
11 - 25	SERIO
0 - 10	COLAPSADO

Este indicador numérico brinda información sobre la condición del pavimento para su aceptación o para identificar necesidades de mejora con procedimientos de mantenimiento. No proporciona información detallada respecto de la capacidad estructural del pavimento y coeficiente de fricción o rugosidad (para la obtención de los mismos es necesario realizar ensayos complementarios); sin embargo, provee de una base de datos objetiva y racional, que de realizarse de

manera periódica y continua es utilizado en los SGPA, para modelar el deterioro del pavimento a través del tiempo e identificar el momento óptimo para realizar intervenciones de mejora en los pavimentos [FAA, 2014 a].

Los lineamientos para la obtención de este indicador están establecidos en la norma ASTM D5340, que es la principal referencia para el desarrollo de este subcapítulo.

2.3.1. Herramientas

- Hojas de datos, que permita registrar: encargado de la inspección, fecha, ubicación (en qué componente y sección se encuentra la unidad de muestra), área de la unidad de muestra y tipos de falla detectados (severidad y cantidades). Un ejemplo de hoja de datos para pavimentos de concreto asfáltico (AC) y de concreto de cemento Pórtland (PCC) se muestran en la Figura 6 y Figura 7 respectivamente.

PAVIMENTO DE ASFALTO EN AEROPUERTOS HOJA DE INSPECCION DE CONDICIONES PARA UNIDAD DE MUESTRA									ESQUEMA:		
Componente:			Sección:			Unidad de muestra:					
Inspeccionado por:			Fecha:			Área de la muestra:					
1 Piel de cocodrilo	6 Erosión por chorro de turbina	11 Agregado pulido	16 Hinchamiento								
2 Exudación	7 Reflexión de juntas PCC	12 Peladura	17 Efecto intemperie								
3 Fisura de bloque	8 Fisuras long. Y transv.	13 Ahuellamiento									
4 Ondulación	9 Derrame de combustible	14 PCC expuesto									
5 Depresión	10 Bacheos	15 Fisura por deslizamiento									
FALLA / SEVERIDAD	CANTIDAD							TOTAL	DENSIDAD	VALOR DE REDUCCIÓN	

Figura 6. Ejemplo de hoja de datos para inspecciones de condición de pavimento AC.

Fuente: [ASTM D5340, 2013]

- Odómetro manual de 0.1 ft (30mm) de precisión.
- Regla o hilo para nivel de 10ft (3m) de longitud (sólo pavimentos AC).
- Regla de 12 in (300 mm) con precisión de 1/8 in (3mm) o mayor.

- Regla para medir asentamientos de 12 in (300 mm) de longitud (sólo pavimentos PCC).
- Plano de distribución de la red de pavimentos.

PAVIMENTO DE CONCRETO DE CEMENTO PORTLAND EN AEROPUERTOS HOJA DE INSPECCIÓN DE CONDICIONES PARA UNIDAD DE MUESTRA				
Componente:		Sección:		Unidad de muestra:
Inspeccionado por:		Fecha:		Área de la muestra:
Tipo de falla				DIAGRAMA: <div style="display: flex; justify-content: space-between; align-items: center;"> 10 </div> <div style="display: flex; justify-content: space-between; align-items: center;"> 9 </div> <div style="display: flex; justify-content: space-between; align-items: center;"> 8 </div> <div style="display: flex; justify-content: space-between; align-items: center;"> 7 </div> <div style="display: flex; justify-content: space-between; align-items: center;"> 6 </div> <div style="display: flex; justify-content: space-between; align-items: center;"> 5 </div> <div style="display: flex; justify-content: space-between; align-items: center;"> 4 </div> <div style="display: flex; justify-content: space-between; align-items: center;"> 3 </div> <div style="display: flex; justify-content: space-between; align-items: center;"> 2 </div> <div style="display: flex; justify-content: space-between; align-items: center;"> 1 </div> <div style="display: flex; justify-content: space-around; width: 100%; margin-top: 10px;"> A B C D E </div>
1 Estallidos	9 Bombeo			
2 Rotura de esquina	10 Desprendimientos, fisuras erráticas, mapa de fisuras			
3 Fisuras longitudinales, transversales y diagonales	11 Asentamientos			
4 Fisura de durabilidad	12 Losa fragmentada			
5 Daño en sello de juntas	13 Fisuras por retracción			
6 Bacheos, 5 pie2	14 Desprendimiento en junta			
7 Bacheos - corte para instalaciones	15 Desprendimiento en esquina			
8 Pérdidas repentinas				
Tipo de Falla	Severidad	Numero de losas	% Densidad	

Figura 7. Ejemplo de hoja de datos para inspecciones de condición de pavimento PCC.
 Fuente: [ASTM D5340, 2013]

2.3.2. Unidades de muestra

La norma ASTM D5340 recomienda que las unidades de muestra a ser inspeccionadas, deben garantizar un nivel de confiabilidad del 95%, y que el muestreo total resulta apropiado para el análisis de proyectos en los que se vayan a estimar cantidades (metrado) a reparar, como es el caso del presente trabajo.

A continuación, se describen los lineamientos a ser considerados para el muestreo de los pavimentos:

- i. Identificar los componentes de la red de pavimentos en el plano (pistas de aterrizaje, calles de rodajes y plataformas).

- ii. Dividir cada uno de los componentes del pavimento en secciones de acuerdo a su diseño, historia de construcción y tráfico.
- iii. Dividir las secciones en unidades de muestra:
 - Pavimento AC: $5000 \pm 2000 \text{ ft}^2$ ($450 \pm 180 \text{ m}^2$)
 - Pavimento PCC: 20 ± 8 losas *

* Las losas deben tener un largo menor o igual a 8m, de lo contrario subdividir las losas en losas imaginarias con "juntas en perfectas condiciones". Este procedimiento debe aplicarse porque los valores de reducción fueron desarrollados para losas de PCC con longitudes menores o iguales a 8m.
- iv. Las unidades de muestra deben ser identificadas de tal forma que permita al encargado de la inspección, ubicarlas fácilmente para verificar la información del deterioro presente, identificar cambios con el tiempo, y permitir futuras inspecciones de la misma muestra de ser necesarias.

2.3.3. Proceso de inspección

Las definiciones y guías para cuantificar e identificar las fallas se encuentran establecidos en los apéndices X1 y X2 de la norma ASTM D5340.

A continuación, se describen los pasos a seguir para la inspección de las unidades de muestra:

- a. Realizar un bosquejo de la unidad de muestra (incluido orientación y, ubicación de la losa de ser el caso).
- b. Registrar el componente, sección y número de la unidad de muestra (número de losas en la unidad de muestra de ser el caso).
- c. Registrar el tamaño de la muestra midiéndola con el odómetro manual.
- d. Realizar la inspección de fallas de la unidad de muestra en estudio, identificando su grado de severidad y registrando la información. Las mediciones se deben realizar utilizando el odómetro manual.

- e. Registrar la cantidad de fallas, para cada tipo de falla y grado de severidad (en metros cuadrados o metros lineales, dependiendo del tipo de falla).
- f. Repetir este procedimiento para cada unidad de muestra a ser inspeccionada.

2.3.4. Cálculo del PCI

Para explicar el proceso de cálculo del PCI, se desarrollará un ejemplo siguiendo los lineamientos establecidos en la ASTM D5340.

En la Figura 8, se muestra una ficha con datos de la inspección a una unidad de muestra de pavimento AC.

PAVIMENTO DE ASFALTO EN AEROPUERTOS HOJA DE INSPECCION DE CONDICIONES PARA UNIDAD DE MUESTRA									ESQUEMA:		
Componente:			Sección:			Unidad de muestra:					
Inspeccionado por:			Fecha:			Área de la muestra: 450m2					
1 Piel de cocodrilo		6 Erosión por chorro de turbina		11 Agregado pulido		16 Hinchamiento					
2 Exudación		7 Reflexión de juntas PCC		12 Peladura		17 Efecto intemperie					
3 Fisura de bloque		8 Fisuras long. Y transv.		13 Ahuellamiento							
4 Ondulación		9 Derrame de combustible		14 PCC expuesto							
5 Depresión		10 Bacheos		15 Fisura por deslizamiento							
FALLA / SEVERIDAD	CANTIDAD							TOTAL	DENSIDAD	VALOR DE REDUCCIÓN	
12L	50	50	34					134	29.78	16.0	
12M	25							25	5.56	17.0	

Figura 8. Ejemplo de hoja de datos para inspección de pavimento AC.

Fuente: Elaboración propia

A continuación, el proceso de cálculo para obtención del PCI de la unidad de muestra del ejemplo:

- i. Sumar la cantidad total de cada tipo de falla y grado de severidad, y registrarlas en la sección Total.

Del ejemplo de la Figura 8, los datos ingresados para fallas son de tipo 12 “Peladura”, 50L, 50L, 34L y 25M; y la suma de cantidades de cada fila es

registrada en Total como 134 m² de severidad baja (L), y 25m² de severidad media (M).

- ii. Dividir los valores de la sección Total entre el área de la unidad de muestra (450 m² en el ejemplo de la Figura 8) y multiplicar por 100 para obtener la Densidad en porcentaje de cada tipo de falla. En el caso de pavimento PCC dividir el número de losas con fallas entre el número de losas de la unidad de muestra.
- iii. Determinar el Valor de Reducción (VR) con los valores de la columna Total y Densidad, proyectados en las “curvas de reducción” del apéndice X3 de la ASTM D5340.

Para el ejemplo corresponde la curva mostrada en la Figura 9.

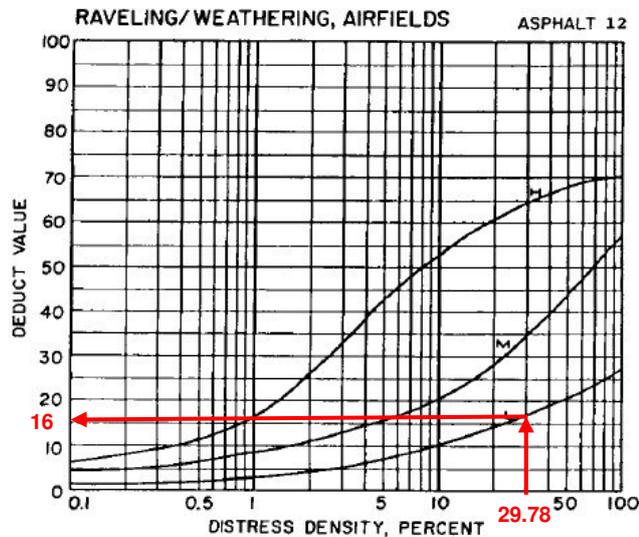


Figura 9. Curva de reducción – Falla tipo 12 (Peladura)

Fuente: [ASTM D5340, 2013]

- iv. Determinar el máximo Valor de Reducción Corregido (VRC).

Si solo uno o ninguno de los VR es mayor a 5, la suma de los VR es el valor de VRC para la determinación del PCI. De no ser así, utilizar el siguiente procedimiento iterativo para determinar el máximo VRC:

- a. Determinar el número máximo de fallas permitidas (m) en una unidad de muestra, de la siguiente manera:

$$m = 1 + (9/95) (100 - \text{máx.VR}) \leq 10$$

Ec. 1. Ecuación para cálculo del número máximos de fallas

Fuente: [ASTM D5340, 2013]

Para el ejemplo de la Figura 8: $m = 1 + (9/95) (100 - 17) = 8.86$

- b. Ingresar los “m” mayores VR en la primera fila de la Tabla 2 (incluido el producto del último de los mayores VR por la parte decimal de “m”). Si hay menos de “m” VR disponibles, ingresar todos los VR. Para el ejemplo de la Figura 8, los valores son: 17 y 16.

Tabla 2. Cálculo del Valor de Reducción Corregido (VRC) – Pavimento AC

Fuente: [ASTM D5340, 2013] / Elaboración propia

#	Valor de Reducción (VR)				Total	q	VRC
1	17	16			33	2	20
2	17	5			22	1	22
3							
4							
5							
Máximo VRC						=	78

- c. Obtener el “total” de los Valores Reducidos (VR), sumando los valores individuales. La primera fila de la Tabla 2, resulta ser 33.

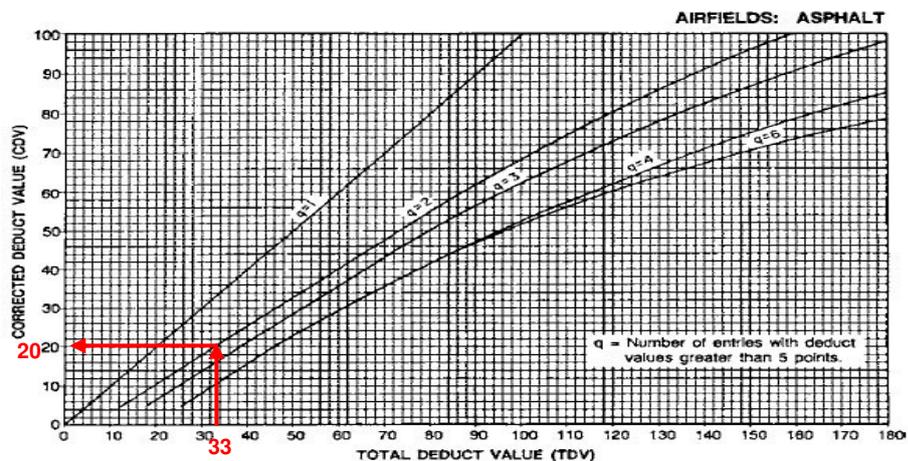


Figura 10. Curva de corrección de VR

Fuente: [ASTM D5340, 2013]

- d. Determinar “q”, que es el número de VR mayores a 5. Siendo $q = 2$ para la primera fila de la Tabla 2.
 - e. Determinar el VRC con los valores de “Total” y “q” de la Tabla 2, con la “curva de corrección de VR” para pavimentos AC” del apéndice X3 de la ASTM D5340. (Ver Figura 10)
 - f. Copiar los VR a la siguiente fila, cambiando el menor VR de la fila anterior mayor que 5 a 5. Luego repetir c, d y e hasta que se cumpla la condición de “q” = 1.
- v. El valor del PCI de la unidad de muestra es obtenido de la siguiente ecuación:

$$PCI = 100 - \text{máximo VRC}$$

Ec. 2. Ecuación para cálculo del PCI de la unidad de muestra

Fuente: [ASTM D5340, 2013]

Por ejemplo de los datos tomados de la Figura 8, que fueron procesados en la Tabla 2, se tiene: $PCI = 100 - 22 = 78$ / Clasificación: Satisfactorio (ver Tabla 1)

- vi. El valor del PCI de la sección se calcula con la Ec. 3

$$PCI_s = \frac{\sum_{i=1}^n (PCI_{ri} \cdot A_{ri})}{\sum_{i=1}^n A_{ri}}$$

Ec. 3. Ecuación para cálculo del PCI de la sección

Fuente: [ASTM D5340, 2013]

Donde:

PCI_s = PCI de la sección

PCI_{ri} = PCI de la unidad de muestra i

A_{ri} = Área de la unidad de muestra i

n = número de unidades de muestra inspeccionadas

Finalmente calificar el PCI de la sección con la escala de la Tabla 1.

2.4. POLÍTICA DE MANTENIMIENTO Y REHABILITACIÓN (M&R)

La política de M&R consiste en identificar todos los tipos posibles de fallas pueden ocurrir en un pavimento aeroportuario, los métodos de reparación y mantenimiento usados actualmente para estos problemas con sus respectivos costos, y los niveles de servicio óptimo y aceptable del pavimento en estudio. Todo esto con la finalidad de aportar a los criterios de toma de decisión para la programación de M&R [FAA, 2014 a].

Hay un intervalo en el que el ratio de deterioro del pavimento es grande en un tiempo corto de la vida del pavimento. También resulta lógico que las intervenciones en un estado con mayor deterioro resulten más costosas que realizarlas cuando el pavimento se encuentra en óptimas o aceptables condiciones [Freeman et al., 2016]. En la Figura 11 se ilustra lo mencionado en este párrafo.

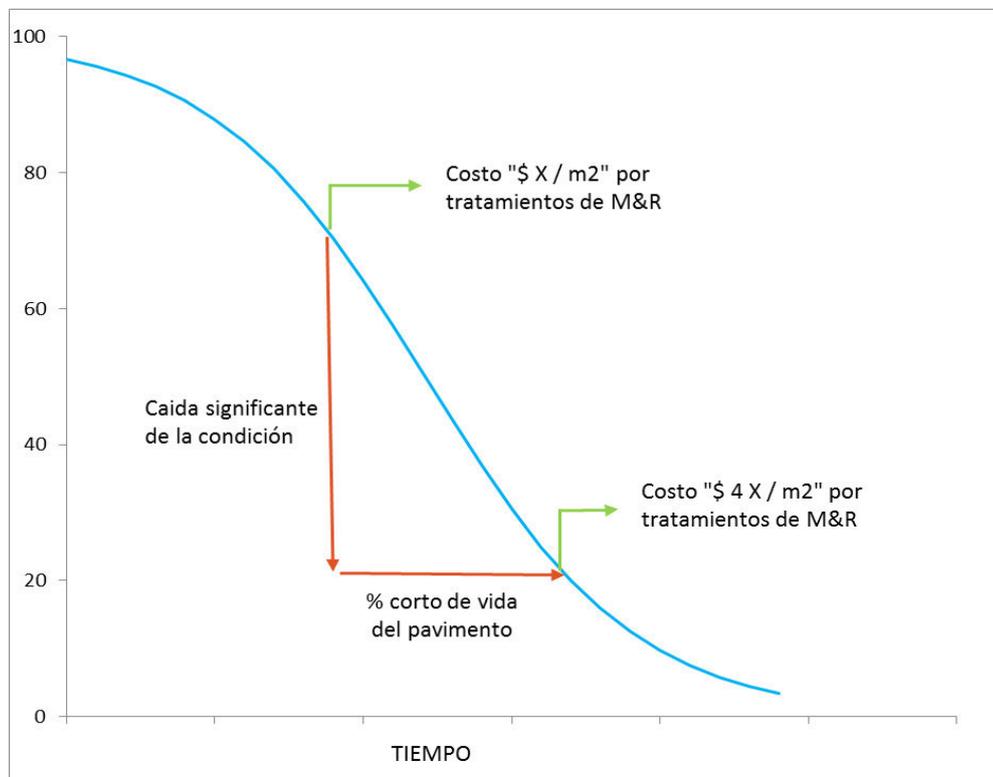


Figura 11. Costo en PCI vs Tiempo

Fuente: [Freeman et al., 2016]

2.4.1. Actividades de M&R

a. Mantenimiento Preventivo:

Es una labor programada de mantenimiento que se realiza a fin de evitar fallas o una reducción de la eficiencia de los pavimentos. Puede ser rutinario o periódico.

- Mantenimiento Rutinario.- Actividades que se efectúan repetidamente, como parte de las actividades anuales, con el propósito de garantizar la confiabilidad y eficiencia de los pavimentos, tal como fueron diseñados, comprende aquellas actividades señaladas en la Tabla 3.
- Mantenimiento Periódico.- Actividades que se realizan en períodos mayores a un año, su periodicidad debe ser definida en el programa de mantenimiento y comprende las actividades señaladas la Tabla 3

b. Mantenimiento Correctivo:

Son las labores de mantenimiento llevadas a cabo con el objetivo de corregir inmediatamente cualquier falla o imperfección de los pavimentos, que atente contra la seguridad operacional de las aeronaves. (Ver Tabla 3)

Tabla 3. Actividades de mantenimiento
 Fuente: [DGAC] / Elaboración propia

Mantenimiento	Frecuencia	Actividades
PREVENTIVO RUTINARIO	Semanal / Mensual	Mantenimiento de la red de drenaje
		Mantenimiento de señalización horizontal
		Mantenimiento y limpieza del pavimento
PREVENTIVO PERIÓDICO	Mayor o igual a un año	Remoción de caucho sobre pavimentos y señalización horizontal
		Mantenimiento de pavimento según fallas
		Mantenimiento de pavimento (intervenciones menores, como sellado de fisuras e impermeabilización contra derrames, según tipo de falla y tratamiento aplicable *)
CORRECTIVO	Una vez detectada la falla	Reparación urgente de canaletas y drenajes
		Reparación urgente de losa de concreto incluyendo juntas si las hubiere
		Reparación (sellado) urgente de fisura de pavimento asfáltico
		Mantenimiento de pavimento (Intervenciones medias, tales como slurry asfáltico superficial y bacheos, según tipo de falla y tratamiento aplicable*)

(*) Ver en la Tabla 4 los tipos de falla y tratamientos aplicables

c. Rehabilitación:

Intervenciones mayores, que modifican la estructura del pavimento, es decir modificación y/o reemplazo de las capas que conforman el pavimento.

d. Reconstrucción:

Reemplazo total de la estructura existente.

2.4.2. Tipos de falla

La norma ASTM D-5340 contiene un manual en el que describe los deterioros característicos de los pavimentos, indicándose además cómo identificar los diferentes niveles de severidad asociados a ellos (leve, medio y alto). En el caso de pavimentos asfálticos se definen 17 deterioros característicos, los cuales se mencionan a continuación y son descritos en la Tabla 4.

- | | |
|--|------------------------------|
| 1. Piel de cocodrilo | 9. Derrame de combustible |
| 2. Exudación | 10. Bacheos |
| 3. Fisura de bloque | 11. Agregado pulido |
| 4. Ondulación | 12. Peladura |
| 5. Depresión | 13. Ahuellamiento |
| 6. Erosión por chorro de turbina | 14. PCC expuesto |
| 7. Reflexión de juntas (PCC) | 15. Fisura por deslizamiento |
| 8. Fisuras longitudinales Y transversales. | 16. Hinchamiento |
| | 17. Efecto intemperie |

2.4.3. Tratamientos aplicables

En la tabla a continuación, se describen los deterioros característicos de los pavimentos AC, sus posibles causas y las medidas de corrección aplicables.

Tabla 4. Deterioro en pavimentos AC (Descripción, causa y medida de corrección)

Fuente: [ASTM D5340, 2013], [Hajek et al., 2011] / Elaboración propia

	TIPO (DESCRIPCIÓN)	CAUSA PROBABLE	MEDIDAS DE CORRECCIÓN
1	Piel de cocodrilo (grietas interconectadas, que forman polígonos con ángulos agudos)	Falla por fatiga de la capa de rodadura asfáltica bajo acción repetida de las cargas de tránsito	Bacheo para una condición localizada. Repavimentación o reconstrucción para la condición severa y extensa
2	Exudación (película brillante, cristalina y reflectora de material bituminoso en la superficie del pavimento)	Exceso de asfalto en la mezcla, exceso de aplicación de un sellante asfáltico o un bajo contenido de vacíos de aire	Quemado y sello asfáltico de tratamiento superficial. Repavimentación o reconstrucción para la condición severa y extensa
3	Fisura de bloque (grietas interconectadas que dividen el pavimento en bloques rectangulares. Los bloques pueden variar en tamaño de 0.30 m x 0.3 m a 3.0 m x 3.0m)	Contracción del concreto asfáltico y los ciclos de temperatura diarios (lo cual origina ciclos diarios de esfuerzo / deformación unitaria)	Picado y sellado de grietas. Repavimentación para la condición severa y extensa
4	Ondulación (cimas y depresiones perpendiculares a la dirección del tránsito, que ocurren a intervalos usualmente a menos de 3.0 m)	Acción del tránsito combinada con una carpeta o una base inestables	Nivelación con mezcla en sitio y repavimentación para condición extensa. Reconstrucción de sectores para la condición localizada
5	Depresión (niveles ligeramente más bajos que el pavimento a su alrededor)	Asentamiento de la subrasante o por una construcción incorrecta	Bacheo para una condición localizada. Reemplazo de material inadecuado para condiciones extensas
6	Erosión por chorro de turbina (áreas oscuras en la superficie del pavimento de hasta 1/2 pulg. aprox. de profundidad)	Ligante bituminoso ha sido quemado o carbonizado	Fresado y recapeo
7	Reflexión de juntas PCC (solamente en pavimentos AC contruidos sobre una losa de PCC)	Movimiento de la losa de PCC, inducido por temperatura o humedad, bajo la superficie AC	Picado y sellado de grietas. reconstrucción para la condición severa y extensa
8	Fisuras long. Y transv. (longitudinales: paralelas al eje del pavimento o a la dirección de construcción, transversales: se extienden en ángulos aproximadamente rectos al eje del mismo o a la dirección de construcción)	Juntas pobremente construidas, contracción de la superficie AC (por temperatura o endurecimiento del asfalto)	Picado y sellado de grietas. Repavimentación para la condición severa y extensa
9	Derrame de combustible (deterioro o reblandecimiento de la superficie del pavimento)	Derrame de combustible u otros disolventes	Fresado y recapeo
10	Bacheos (área de pavimento que ha sido reemplazada con material nuevo, un parche)	Parche para reparar el pavimento existente	Es considerado un defecto no importa que tan bien se comporte
11	Agregado pulido (superficie del pavimento suave al tacto)	Repetición de cargas de tránsito	Fresado y Slurry asfáltico superficial
12	Peladura (desprendimiento de los agregados y pérdida de asfalto)	Ligante asfáltico endurecido significativamente.	Slurry asfáltico superficial

	TIPO (DESCRIPCIÓN)	CAUSA PROBABLE	MEDIDAS DE CORRECCIÓN
13	Ahuellamiento (depresión en la superficie de las huellas de las ruedas)	Deformación permanente en cualquiera de las capas del pavimento o la subrasante, usualmente producida por consolidación o movimiento lateral de los materiales debido a la carga del tránsito	Nivelación con mezcla en sitio y repavimentación para condición extensa.
14	PCC expuesto (corre el asfalto de la superficie y se produce rotura)	Pavimentos de concreto se expanden incrementando su longitud	Bacheo para una condición localizada. reconstrucción para la condición severa y extensa
15	Fisura por deslizamiento (corrimento longitudinal y permanente de un área localizada de la superficie del pavimento)	Cargas del tránsito	Picado y sellado de grietas.
16	Hinchamiento (pandeo hacia arriba de la superficie del pavimento, una onda larga y gradual con una longitud mayor que 3.0 m, puede estar acompañado de agrietamiento superficial)	Congelamiento en la subrasante o por suelos potencialmente expansivos	Bacheo para una condición localizada. Reemplazo de material inadecuado para condiciones extensas
17	Efecto intemperie (desgaste superficial)	Desprendimiento de asfalto y de la matriz de agregados finos de la superficie	Slurry asfáltico superficial

Hajek et al. (2011) describe la calificación PCI de la norma ASTM D5340 y señala las intervenciones aplicables a los pavimentos en un sistema de gestión (ver Tabla 5).

Tabla 5. Interpretación de la calificación PCI.

Fuente: [Hajek et al., 2011]

CALIFICACIÓN PCI		DESCRIPCIÓN	TRATAMIENTOS / INTERVENCIONES APLICABLES
86 - 100	BUENO	Prsenta sólo fallas menores	Mantenimiento preventivo
71 - 85	SATISFACTORIO	Presenta fallas leves y medias	Mantenimiento preventivo
56 - 70	ACEPTABLE	Presenta algunas fallas severas	Mantenimiento correctivo
41 - 55	POBRE	La severidad de algunas fallas pueden ocasionar problemas operacionales	Rehabilitación
26 - 40	MUY POBRE	Las fallas severas ocasionan problemas operacionales	Rehabilitación o reconstrucción
11 - 25	SERIO	Las fallas severas ocasionan restricciones operacionales	Reparaciones inmediatas y reconstrucción
0 - 10	FALLA	El deterioro de pavimento impide operaciones seguras de aeronaves	Reconstrucción

2.4.4. Niveles de servicio

Hajek et al. (2011) identifica los niveles de servicio óptimo y aceptable para las distintas componentes de la red de pavimentos de un aeropuerto (ver Tabla 6).

Tabla 6. Niveles de servicio para pavimentos AC de aeropuertos.

Fuente: [Hajek et al., 2011]

COMPONENTE	PCI PROMEDIO DE TODAS LAS SECCIONES		PCI SECCIÓN INDIVIDUAL
	ÓPTIMO	MÍNIMO ACEPTABLE	MÍNIMO ACEPTABLE
PISTA DE ATERRIZAJE	80	65	55
CALLE DE RODAJE	70	60	45
PLATAFORMA DE ESTACIONAMIENTO	70	60	40

2.5. MODELOS DE DETERIORO

Los modelos de deterioro o también llamados modelos de predicción son una herramienta esencial para los SGPA. Son relativos a la influencia de los indicadores de estado de los pavimentos y se emplean para el análisis económico del ciclo de vida del pavimento; dado que, permiten predecir cuándo serán necesarias las intervenciones en el pavimento y el presupuesto requerido para la preservación del mismo [FAA, 2014 a].

Los modelos de predicción fueron desarrollados para representar el comportamiento promedio de una familia de pavimentos, una familia de pavimentos es definida como el grupo de secciones de pavimento con el mismo tipo de pavimento y uso; es así que, resultados de diversos análisis y estudios, han demostrado que el PCI está relacionado con la edad del pavimento, y que no se puede encontrar una correlación importante con otras variables, a pesar que las familias de pavimentos fueron definidas correctamente. Por ejemplo, las pistas de aterrizaje y plataformas de estacionamiento no se combinaron en una misma familia [Butt et al., 1987].

En la Figura 12, se muestra la extrapolación de una curva modelo de predicción PCI vs. Edad del pavimento, en la que se puede predecir el PCI futuro de una sección específica del pavimento, dibujando una curva paralela a la curva modelo de predicción para la familia, a través del punto de condición presente.

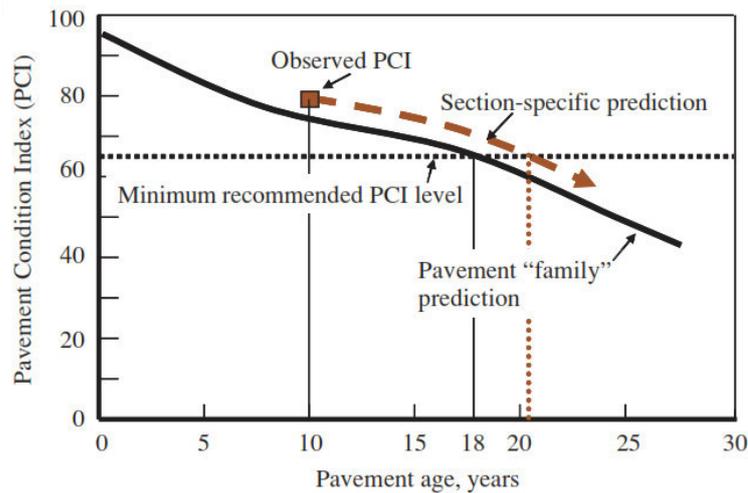


Figura 12. Curva de predicción de la condición del pavimento (ejemplo)

Fuente: [Hajek et al., 2011]

Existen distintos tipos de estos modelos, los cuales pueden agruparse en dos clases [Solminihac, 2005]:

a. Probabilísticos

La condición futura del pavimento se estima como una función de probabilidad para el conjunto de posibles estados que podrían presentarse. Incluyen los modelos de:

- Cadenas de Markov.- Conociendo el estado precedente o el estado del pavimento de manera probabilística, se puede emplear el proceso o cadenas de Markov para predecir el estado siguiente, nuevamente de manera probabilística, para tantos periodos de tiempo como sean deseados.
- Curvas de Supervivencia.- Describen el deterioro del pavimento en forma de distribución acumulativa, que consecuentemente puede ser empleada para desarrollar la matriz de probabilidad de transición.

b. Deterministas

La condición futura se establece mediante un valor preciso, que se calcula relacionando de diversas maneras un indicador de deterioro con un conjunto de variables explicativas. Los modelos deterministas incluyen respuestas primarias,

el comportamiento funcional y estructural del pavimento, así como modelos de daño. [Butt et al., 1994]

En esta clase se agrupan los modelos:

- Empíricos.- La variable dependiente, que representa un deterioro funcional o estructural, observado o medido, se relaciona con una o más variables independientes como la resistencia de la subrasante, las cargas por eje, los espesores y propiedades de las capas del pavimento, factores ambientales o las interacciones de estas variables.
- Mecánico Empíricos.- A través de ecuaciones de regresión, relacionan un parámetro de respuesta con un deterioro funcional o estructural medido, como defectos superficiales o irregularidad.
- Mecánico.- Se basan en algún tipo de respuesta primaria como el esfuerzo, la deformación o la deflexión.

El desarrollo de un modelo de deterioro debe ser realizado siguiendo los siguientes pasos [Nuñez y Shahin, 1986]: (ver Figura 13)

1. Recuperación y almacenamiento de datos por familia de pavimentos.
2. Preselección para identificar los errores obvios.
3. Identificación de valores atípicos.
4. Desarrollo del modelo.

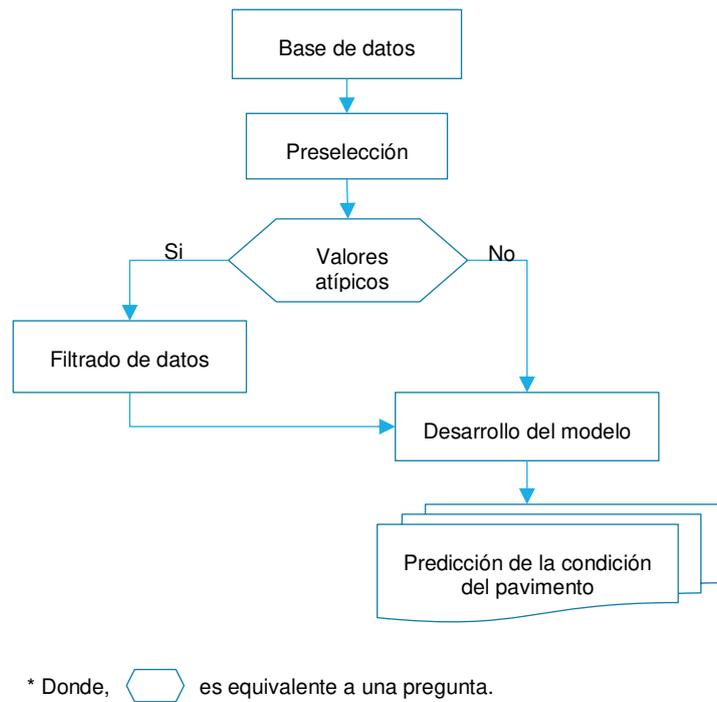


Figura 13. Diagrama de flujo del proceso de modelamiento

Fuente: [Nuñez y Shahin, 1986]

2.5.1. Cadenas de Markov

El planeamiento de preservación de la red de pavimento no es un proceso estático, por ello los SGPA se basan en la probabilidad como una herramienta para determinar la condición futura del pavimento [Zimmerman, 1995].

Un pavimento inicia su ciclo de vida en casi perfectas condiciones y es después sometido a ciclos de servicio que causan el deterioro de la condición del pavimento. La extrapolación de la curva del proceso de Markov representa el comportamiento futuro del pavimento y permite una programación dinámica, para producir estrategias óptimas de M&R [Butt et al., 1994].

Para el desarrollo de este modelo, los estados del proceso de Markov corresponden a distintos niveles de deterioro del pavimento definidos en la calificación del PCI. El rango de PCI (de 0 a 100), se divide en diez “estados” de 10 puntos de intervalo, tal como se ilustra en la Tabla 7.

Tabla 7. Estados del pavimento – Proceso de Markov.

Fuente: [Butt et al., 1994]

ESTADO	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
RANGO PCI	100-90	90-80	80-70	70-60	60-50	50-40	40-30	30-20	20-10	10-0

La Ec. 4 ilustra el vector de estado para un determinado ciclo de servicio.

VECTOR DE ESTADO (\bar{E}) EN EL CICLO DE SERVICIO “i”:

$$\bar{E}_{(i)} = [p_i(A) \quad p_i(B) \quad p_i(C) \quad p_i(D) \quad p_i(E) \quad p_i(F) \quad p_i(G) \quad p_i(H) \quad p_i(I) \quad p_i(J)]$$

Ec. 4. Vector de estado para el ciclo de servicio “i”

Fuente: [Butt et al., 1994]

Donde, $p_i(X)$ es la probabilidad de que el pavimento se encuentre en el estado “X” en el ciclo de servicio “i”, el “vector de estado” ($\bar{E}_{(i)}$) indica la probabilidad de que una sección de pavimento se encuentre en cada uno de los diez estados en un año de servicio (i) y un “ciclo de servicio” tiene la duración de un año, tiempo en el que el pavimento es sometido a un determinado clima y tráfico.

En la gestión de pavimentos se asume que todas las secciones del pavimento se encuentran en el estado “A” (PCI de 90 a 100) a la edad de cero años (ciclo de servicio “0”), resultando un vector de estado:

$$\bar{E}_{(0)} = [1 \quad 0]$$

Ec. 5. Vector de estado para el ciclo de servicio “0”

Fuente: [Butt et al., 1994]

Para modelar la manera en que el pavimento se deteriora con el tiempo, es necesario identificar la Matriz de Probabilidades de Transición (MPT).

Se asume que la condición de pavimento no puede caer más de un estado (10 puntos) durante un ciclo de servicio. Además, el pavimento puede permanecer en su estado o deteriorarse y pasar al siguiente estado en un año. En consecuencia, la MPT tiene la siguiente forma:

$$\bar{P} = \begin{bmatrix} p_{AA} & p_{AB} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & p_{BB} & p_{BC} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & p_{CC} & p_{CD} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & p_{DD} & p_{DE} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & p_{EE} & p_{EF} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{FF} & p_{FG} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{GG} & p_{GH} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{HH} & p_{HI} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{II} & p_{IJ} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Ec. 6. Matriz de Probabilidades de Transición

Fuente: [Butt et al., 1994]

Donde, p_{ij} es la probabilidad de que el pavimento en estado i , cambie al estado j entre los ciclos de servicio t y $t+1$.

El valor de 1 en la última fila de la MPT corresponde al estado "J" (PCI de 0 a 10), que indica que la condición del pavimento no puede pasar de este estado, a menos que se realice una intervención en el pavimento.

El vector de estado para cualquier año de servicio se obtiene de multiplicar el vector de estado inicial por la MPT, tal como se ilustra en la Ec. 7.

$$\begin{aligned} \bar{E}_{(1)} &= \bar{E}_{(0)} \times \bar{P} \\ \bar{E}_{(2)} &= \bar{E}_{(1)} \times \bar{P} = \bar{E}_{(0)} \times \bar{P}^2 \\ &\vdots \\ &\vdots \\ \bar{E}_{(t)} &= \bar{E}_{(t-1)} \times \bar{P} = \bar{E}_{(0)} \times \bar{P}^t \end{aligned}$$

Ec. 7. Cálculo de vectores de estado

Fuente: [Butt et al., 1994]

Con este proceso, si la matriz de transición puede ser estimada, el estado del pavimento para cualquier ciclo de servicio se puede predecir. La matriz de transición puede ser determinada en base al criterio de expertos o si se cuenta con datos históricos, mediante regresión no lineal, donde el objetivo es minimizar la diferencia entre el PCI obtenido en función del tiempo (producto de la regresión) y el valor predecido (usando la cadena de Markov) para un ciclo de servicio determinado [Butt et al., 1994].

2.5.2. Regresión logística

La regresión logística significa suponer que $p(x)$ se relaciona con x mediante la función logística (ver Ec. 8). Mientras que $p(x)$ es una probabilidad y, por lo tanto, debe estar entre 0 y 1, $\beta_0 + \beta_1x$ no necesita estar en este intervalo [Devore Jay, 2005].

$$p(x) = \frac{e^{\beta_0 + \beta_1x}}{1 + e^{\beta_0 + \beta_1x}}$$

Ec. 8. Función logística - Representación matemática

Fuente: [Devore Jay, 2005].

Como se citó anteriormente, diversos análisis y estudios han demostrado que el PCI está relacionado con la edad del pavimento y, una función que ha sido encontrada útil en la gestión de pavimentos, es la función logística (curva "s") [Solminihac, 2005].

Un pavimento inicia su ciclo de vida en "casi perfectas condiciones" (tendencia al valor PCI=100) y, después de ser sometido a los ciclos de servicio y cumplir su vida útil, el PCI tiene tendencia al valor "0". Además, cabe mencionar que no es posible un incremento en el valor del PCI en el tiempo, a menos que se realice una intervención en el pavimento. La representación de las características mencionadas anteriormente, es garantizada con una regresión logística, que crea una curva con forma de "S" con restricciones máximas y mínima [Butt et al., 1994]. Cuya representación gráfica es la siguiente:

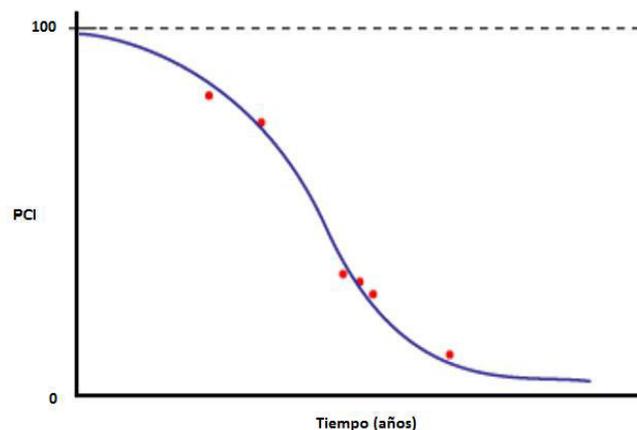


Figura 14. Función logística - Representación gráfica (PCI vs tiempo)

Fuente: [Devore Jay, 2005], [Solminihac, 2005]

Y la representación matemática es la siguiente:

$$PCI(t) = 100 \times \frac{e^{\beta_0 + \beta_1 t}}{1 + e^{\beta_0 + \beta_1 t}}$$

Ec. 9. Función logística PCI(t) - Representación matemática

Fuente: [Devore Jay, 2005], [Solminihac, 2005]

Donde β_0 y β_1 son constantes, y t la variable independiente (tiempo).

Ajustar la regresión logística a los datos de la muestra, requiere determinar los parámetros con un proceso que es complicado detallar. Sin embargo, los paquetes de software de estadística hacen esto si se solicita [Devore Jay, 2005].

2.5.3. Procedimiento de análisis de datos

Para asegurar la construcción de un modelo de deterioro apropiado, la información defectuosa ser separada previamente. Los errores pueden ser cometidos durante la toma de datos (inspección al pavimento) o ingresando los valores a la base de datos [Nuñez y Shahin, 1986].

A continuación se presenta un proceso de preselección de datos para identificar los datos defectuosos y, un proceso método gráfico de la estadística descriptiva para detectar los valores atípicos o también conocidos como “outliers”.

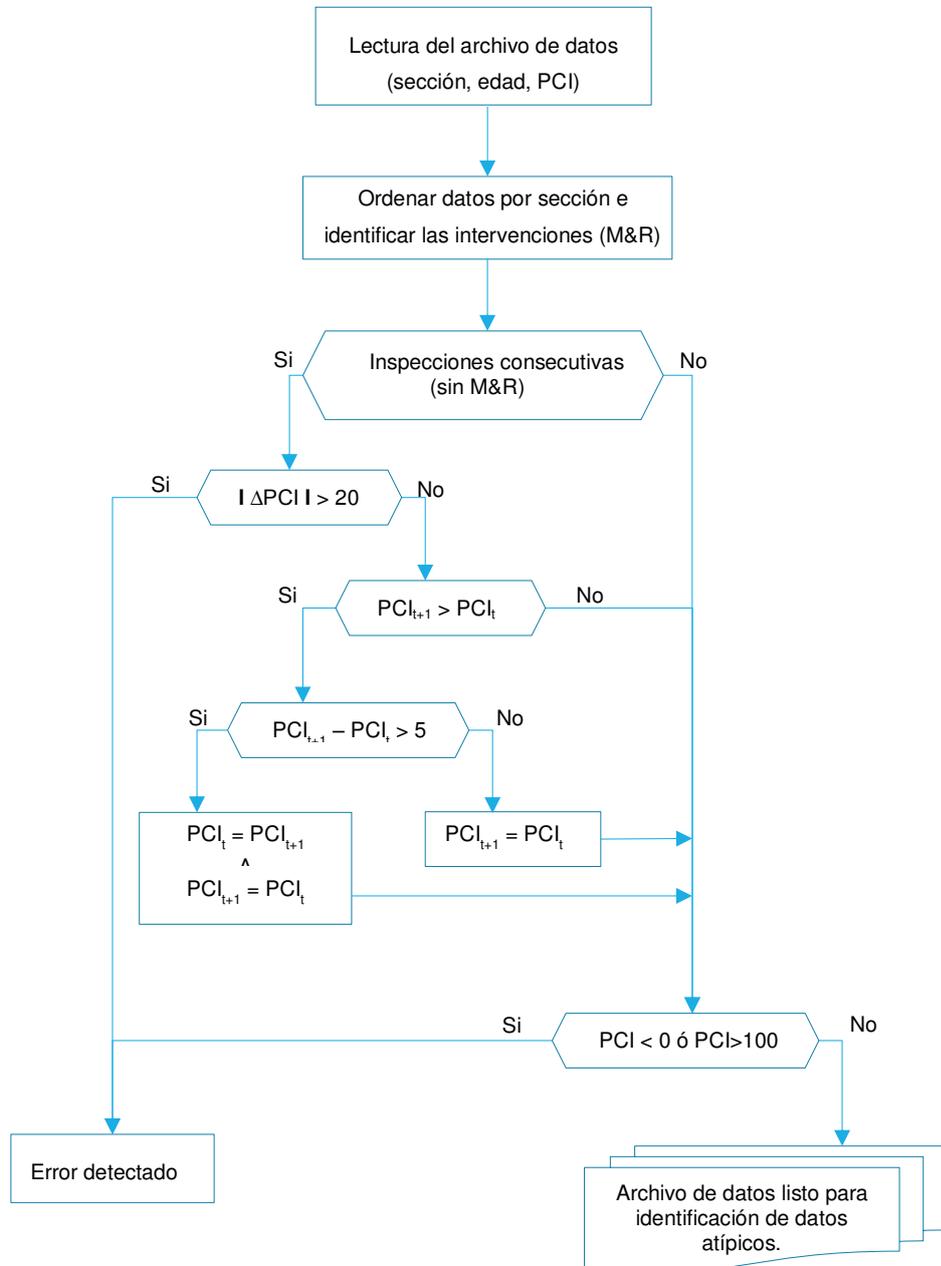
a. Preselección de datos

Previo a identificar los “errores”, los valores de PCI correspondientes a las unidades de muestra, deben ser ordenados por sección de pavimento, tiempo desde que el pavimento fue construido o la última reconstrucción (edad), y por último identificar las intervenciones realizadas al pavimento (M&R) [Nuñez y Shahin, 1986].

Para identificar los datos defectuosos, teniendo en cuenta los siguientes criterios [Butt et al., 1994], [ASTM D5340, 2013]:

- Se comparan datos secuenciales, entre los que no hubo intervenciones.
- La condición de pavimento no puede caer más de un estado, es decir, la diferencia de PCI no puede ser más de 20 puntos.

- El PCI no puede incrementar a menos que se realice una intervención. De ser el caso, si el incremento es mayor a 5 puntos, invertir los valores, caso contrario, igualar los valores de PCI.
- El rango de PCI es de 0 a 100.



* Donde,  es equivalente a una pregunta.

Figura 15. Diagrama de flujo del proceso de preselección de datos
 Fuente: [Nuñez y Shahin, 1986], [Butt et al., 1994], [ASTM D5340, 2013] / Elaboración propia

b. Identificación de valores atípicos

Se empleará método gráfico de la estadística descriptiva llamado “diagrama de caja”.

El diagrama de caja es usado para identificar los valores atípicos, debido a que incluso un solo punto atípico afecta de manera drástica la media y la desviación estándar del conjunto de datos. Un diagrama de caja se basa en el siguiente resumen de cantidades [Devore, 2005]:

X_{\min}	: valor mínimo	Q3	: cuarto superior
Q1	: cuarto inferior	X_{\max}	: valor máximo
Q2	: mediana	fs	: cuarta dispersión, $fs = Q3 - Q1$

Cualquier observación fuera del rango “ $Q1 - 1.5fs$ ” a “ $Q3 + 1.5fs$ ”, es un valor atípico, el cual no debe ser usado en un análisis [Devore, 2005].

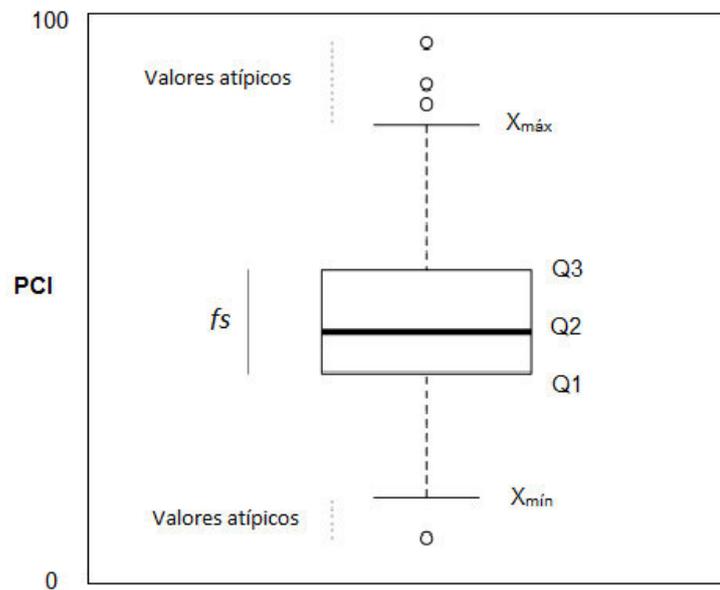


Figura 16. Diagrama de caja – Valores atípicos PCI

Fuente: [Devore, 2005] / Elaboración propia

CAPÍTULO III: PRESENTACIÓN DE BASE DE DATOS

Para el desarrollo del presente capítulo se revisó los antecedentes históricos de construcción de los principales aeropuertos del país y se seleccionó el aeropuerto de Cajamarca “Mayor General FAP Armando Revoredo Iglesias”, dado la cantidad de información que se logró recopilar.

En la Figura 17, se muestra una línea de tiempo de la información recopilada del Aeropuerto de Cajamarca y, se incluye en el año 2017 la propuesta de implementación de un SGPA, que resulta del desarrollo de un caso práctico en la presente investigación.



Figura 17. Línea de tiempo - Aeropuerto de Cajamarca.

Fuente: [DGAC] / Elaboración propia

Cabe mencionar que, el análisis y proceso de la gestión de pavimentos, será realizado para la **pista de aterrizaje**, componente principal de los pavimentos del área de movimiento del aeropuerto.

La base de datos presentada a continuación, ha sido elaborada siguiendo los lineamientos explicados en el ítem 2.2.2 del presente documento.

3.1. INVENTARIO

A continuación, se presenta la localización, dimensiones y tipo de pavimento de la pista de aterrizaje del aeropuerto de Cajamarca. Además, en el Apéndice 1 se encuentra el Plano de Ubicación y Localización del aeropuerto “Mayor General FAP Armando Revoredo Iglesias”.

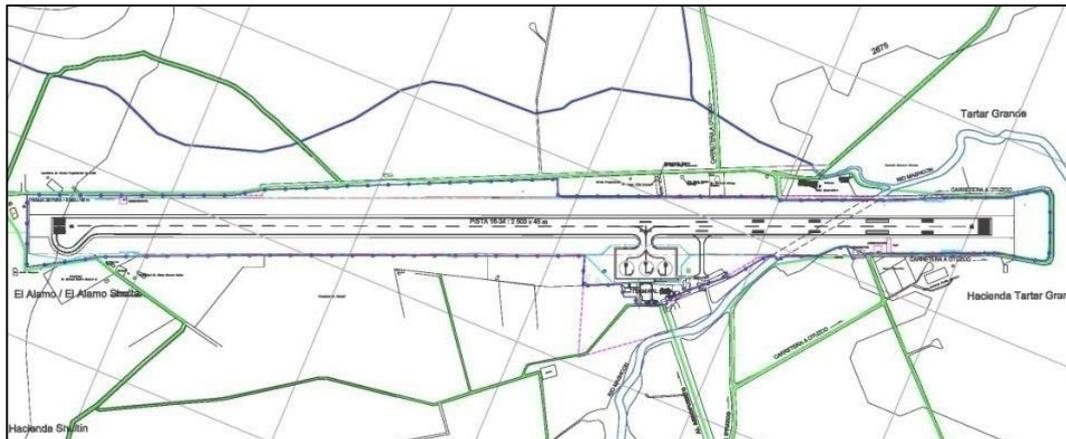


Figura 18. Imagen del plano - pista de aterrizaje, Aeropuerto de Cajamarca.

Fuente: [DGAC] / Elaboración propia

- Clave de referencia del aeropuerto : 3C
- Aeronave máximo permisible : Boeing 737 (PMD = 134000 lb)
- Temperatura promedio : 21 °C
- Número designador de pista : 16-34
- Localización de la pista de aterrizaje
 - Departamento : Cajamarca
 - Provincia : Cajamarca
 - Distrito : Baños del Inca
 - Coord. Geográficas : 07°08'20.92"S / 78°29'22.49"W
 - Altitud : 2697 m.s.n.m.
 - Temp. Promedio : 21 °C

- Dimensiones de la pista de aterrizaje

Ancho	:	45 m
Longitud	:	2500 m

- Características del pavimento de la pista de aterrizaje

Tipo	:	Concreto Asfáltico (AC)
Resistencia	:	PCN 45/F/D/X/T

3.2. RED DE DRENAJE

La [FAA, 2014 b] en su guía rápida para el mantenimiento y reparación de los problemas comunes en las superficies de pavimento AC, señala que las causas de los problemas con los drenajes son el pobre mantenimiento de las instalaciones de drenaje y las pendientes; siendo las medidas correctivas la limpieza del curso de los drenajes, limpieza de las estructuras de drenaje (tales como drenajes laterales y tuberías de descarga) y mantenimiento a las pendientes de los márgenes del pavimento.

El aeropuerto de Cajamarca (aeropuerto concesionado desde el año 2007) cuenta con red de drenaje superficialⁱ, el mismo que se encuentra en óptimas condiciones, debido a que, como parte del contrato de concesión, el concesionario está obligado a realizar mantenimiento preventivoⁱⁱ rutinario (ver Tabla 3) el cual incluye actividades semanales de mantenimiento de la red de drenaje [DGAC].

ⁱ El drenaje superficial controla, colecta y elimina el agua proveniente de las tormentas de lluvia y, el derretimiento de la nieve y el hielo que se acumula en la superficie. [FAA, 2014 b]

ⁱⁱ El mantenimiento del sistema de drenaje del aeropuerto es esencial en el mantenimiento preventivo de los pavimentos. Un inadecuado sistema de drenaje puede causar saturación de la subrasante y subbase; y pérdida de la capacidad de carga de los pavimentos. [FAA, 2014 b]

Cabe mencionar, que se verifica en los reportes de inspección a los pavimentos que las fallas predominantes en la pista de aterrizaje del aeropuerto de Cajamarca son grietas longitudinales y transversales, y peladura; cuyo origen no está relacionado con el funcionamiento de la red de drenajes (ver Tabla 4).

3.3. ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO

El número designador de la pista de aterrizaje es 16-34, cuenta con un PCN 45/F/DX/T y el tipo de aeronave máximo permisible es la Boeing 737 (PMD = 134000 lb).

En la Figura 19 se muestra la sectorización de la pista de aterrizaje, basada en la estructura (material y espesor), historial de construcción y M&R (que veremos en el ítem 0), y sectores donde las cargas de tráfico son uniformes.

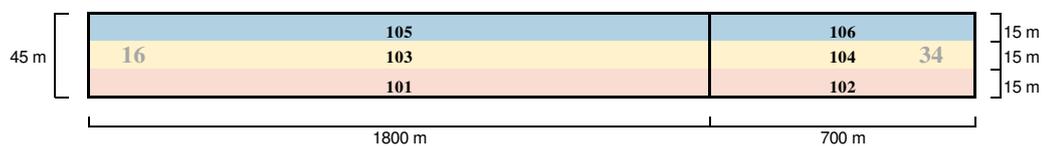


Figura 19. Sectorización - Pista de aterrizaje del Aeropuerto de Cajamarca

Fuente: Elaboración propia

Luego de tomar en cuenta los criterios antes mencionados para la sectorización, al mes de octubre del 2017, las secciones de la pista de aterrizaje tienen la estructura (material y espesor) que se detalla a continuación:

Tabla 8. Estructura de la pista de aterrizaje año 2017 (material y espesor)

Fuente: [DGAC, 2017] / Elaboración propia

SUPERFICIE DE RODADURA	SECCIÓN					
	101	102	103	104	105	106
Concreto Asfáltico (cm)	12.5	13.7	12.5	12.5	13.7	12.5
Base triturada (cm)	51	51	51	56	56	56
Sub base granular (cm)	39	39	39	20	20	20

3.4. HISTORIAL DE CONSTRUCCIÓN Y M&R

- **1973 / Construcción inicial**, pista de aterrizaje de 1820 m de longitud por 30 m de ancho.

No se encontró el expediente técnico o documentación técnica referida al citado proyecto. Sin embargo, con fines de conocer la estructura inicial del pavimento, se consultó con los profesionales de la DGAC sobre información que pueda resultar útil para el presente trabajo, y de las averiguaciones se supo que dicha estructura del pavimento fue modificada por completo en el año 2002, con la ejecución del “Proyecto de ampliación y mejoramiento de los pavimentos del Aeropuerto de Cajamarca”, dado que se construyó una estructura uniforme en el nuevo ancho de la pista (45 m).

- **2003 / Proyecto de ampliación** y mejoramiento de los pavimentos del Aeropuerto de Cajamarca. Pista de aterrizaje de 2500 m de longitud por 45 m de ancho, con la estructura mostrada en la Tabla 9.

Tabla 9. Estructura de la pista de aterrizaje año 2003 (material y espesor)

Fuente: [DGAC] / Elaboración propia

SUPERFICIE DE RODADURA	SECCIÓN					
	101	102	103	104	105	106
Concreto Asfáltico (cm)	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5
Base triturada (cm)	51	51	51	56	56	56
Sub base granular (cm)	39	39	39	20	20	20

- **2014 / Mantenimiento periódico**, la carpeta de la pista de aterrizaje se modifica y resulta con la estructura mostrada en la Tabla 8.

3.5. CONDICIÓN DEL PAVIMENTO

La condición superficial del pavimento es determinada siguiendo los lineamientos descritos en el ítem 2.3.

Al mes de octubre del 2017, las fallas predominantes en la pista de aterrizaje del aeropuerto de Cajamarca son bacheos, grietas longitudinales y transversales, y peladura, como se puede apreciar en la Figura 20 y Figura 21.

El detalle de las inspecciones realizadas en los años 2007, 2013, 2014 y 2015 (data histórica recopilada), es presentado en el Anexo 1 y en la Tabla 10 se muestra el resumen (fecha y PCI calculado para cada sección) de las inspecciones realizadas a los pavimentos del aeropuerto en estudio.



Figura 20. Fallas - Pista de aterrizaje del Aeropuerto de Cajamarca
Fuente: [DGAC, 2017]



Figura 21. Fallas - Pista de aterrizaje del Aeropuerto de Cajamarca
Fuente: [DGAC, 2017]

Tabla 10. Tabla resumen de PCI por sección
 Fuente: [DGAC] / Elaboración Propia

Sección	Fecha de inspección	PCI	Clase
101	2007	91	RWY
	2013	68	RWY
	2014	82	RWY
	2015	82	RWY
102	2007	91	RWY
	2013	66	RWY
	2014	81	RWY
	2015	88	RWY
103	2007	89	RWY
	2013	64	RWY
	2014	88	RWY
	2015	84	RWY
104	2007	90	RWY
	2013	61	RWY
	2014	83	RWY
	2015	92	RWY
105	2007	91	RWY
	2013	63	RWY
	2014	84	RWY
	2015	82	RWY
106	2007	91	RWY
	2013	63	RWY
	2014	83	RWY
	2015	85	RWY

3.6. DATOS DE TRÁFICO

Los datos de tráfico presentados en la Tabla 11 y Tabla 12, deriva de la base de datos de las operaciones realizadas en el año 2016 y las proyecciones estimadas en el Plan Maestro de Desarrollo del aeropuerto de Cajamarca respectivamente.

Los datos de tráfico son necesarios para analizar las posibles causas del deterioro del pavimento y proponer adecuadas alternativas M&R, que consideren la disminución o incremento de repeticiones de cargas de tránsito, o un tránsito constante en el tiempo.

Tabla 11. Resumen de las operaciones del año 2016

Fuente: [DGAC]

Marca - Tipo de aeronave	PMD* (lb)	salidas anuales	% participación
BOEING-B737-500	134000	672	37.2
AIRBUS-A319	150796	419	23.2
AIRBUS-A320	172842	552	30.5
DASH 7	43799	159	8.8
C-27J SPARTAN	70107	2	0.1
ANTONOV-AN-32	59471	4	0.2

(*) PMD: Peso máximo de despegue de la aeronave.

Tabla 12. Proyección de operaciones 2017-2034

Fuente: [DGAC]

Año	N° operaciones promedio anual	N° salidas promedio anual
2017	4245	2123
2018	4542	2271
2019	4860	2430
2020	5201	2601
2021	5565	2783
2022	5943	2972
2023	6335	3168
2024	6741	3371
2025	7159	3580
2026	7588	3794
2027	8021	4011
2028	8454	4227
2029	8894	4447
2030	9320	4660
2031	9740	4870
2032	10139	5070
2033	10535	5268
2034	10945	5473

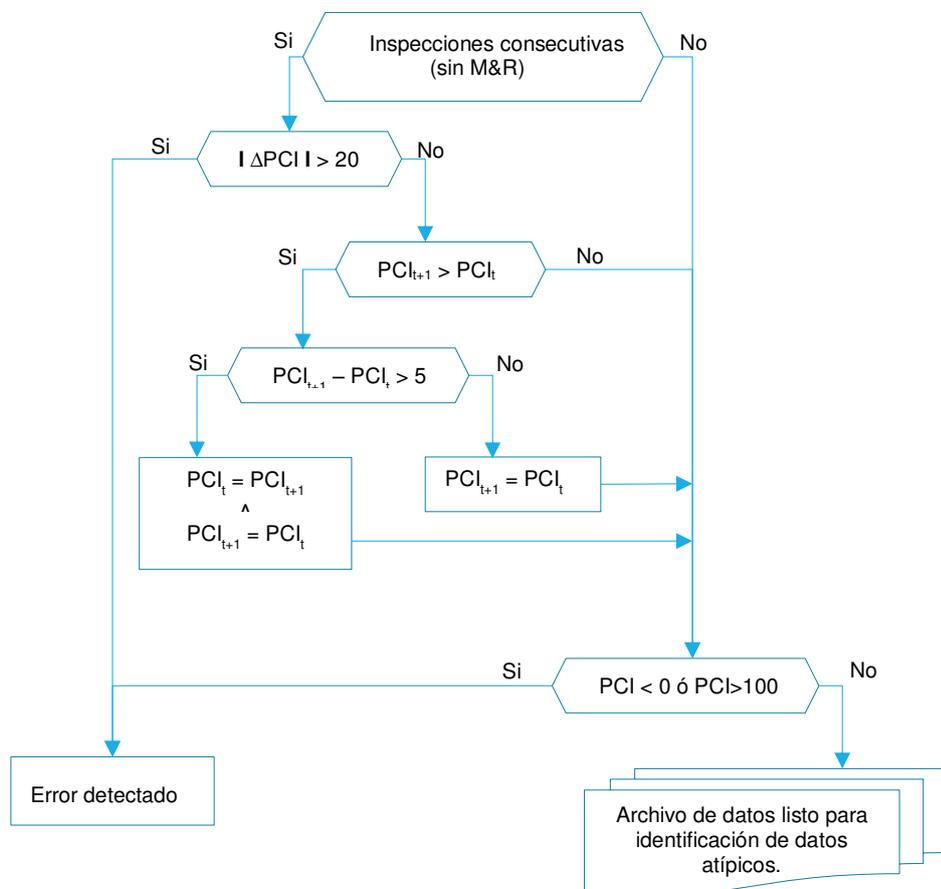
CAPÍTULO IV: APLICACIÓN DE MODELO NUMÉRICO CUANTITATIVO CON FINES DE GESTIÓN DE PAVIMENTOS EN AEROPUERTOS

Para el presente trabajo se desarrollará un modelo numérico cuantitativo, aplicando cadenas de Markov descrito en el ítem 2.5.1.

4.1. ANÁLISIS DE DATOS

Como paso previo al desarrollo del modelo, se debe realizar el filtro y análisis de los valores atípicos de la base de datos (ver ítem 2.5.3.).

Los datos presentados en Anexo 1, fueron preseleccionados de la siguiente manera:



* Donde,  es equivalente a una pregunta.

Figura 22. Diagrama de flujo del proceso de preselección de datos

Fuente: [Nuñez y Shahin, 1986], [Butt et al., 1994], [ASTM D5340, 2013] / Elaboración propia

A continuación, se emplea el método gráfico de la estadística descriptiva denominado “diagrama de caja”, para la identificación de los datos atípicos.

Donde:

$X_{\text{mín}}$: valor mínimo	Q3	: cuarto superior
Q1	: cuarto inferior	$X_{\text{máx}}$: valor máximo
Q2	: mediana	f_s	: cuarta dispersión $f_s = Q3 - Q1$

Cualquier observación fuera del rango “ $Q1 - 1.5f_s$ ” a “ $Q3 + 1.5f_s$ ” es un valor atípico y debe ser eliminado del análisis [Devore, 2005].

En la Tabla 13, Tabla 14, Tabla 15 y Tabla 16, se presentan los valores del diagrama de caja para cada sección, de los cuales se puede apreciar que los años 2013, 2014 y 2015, presentan valores atípicos; mientras que los datos del año 2007 se encuentran dentro del rango.

En la Tabla 17, Tabla 18 y Tabla 19, se presentan los valores del diagrama de caja para cada sección después de eliminar los valores atípicos, de los cuales se puede apreciar que se encuentran dentro del rango “ $Q1 - 1.5f_s$ ” a “ $Q3 + 1.5f_s$ ”.

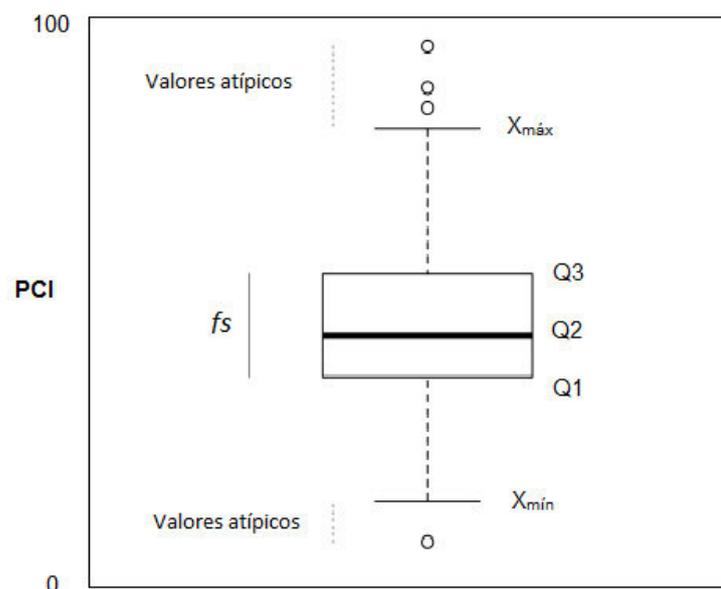


Figura 23. Diagrama de caja – Valores atípicos PCI

Fuente: [Devore, 2005] / Elaboración propia

Tabla 13. Identificación de valores atípicos PCI 2007

Fuente: Elaboración propia

VALORES DEL DIAGRAMA DE CAJA - PCI 2007									
Sección:	101	Sección:	103	Sección:	105	Sección:	102	Sección:	104
Xmín=	91	Xmín=	85	Xmín=	91	Xmín=	91	Xmín=	90
Q1=	91	Q1=	87	Q1=	91	Q1=	91	Q1=	90
Q2=	91	Q2=	90	Q2=	91	Q2=	91	Q2=	90
Q3=	91	Q3=	90	Q3=	91	Q3=	91	Q3=	90
Xmáx=	91	Xmáx=	83	Xmáx=	0	Xmáx=	91	Xmáx=	90
fs =	0	fs =	3	fs =	0	fs =	0	fs =	0
Q1-1.5fs =	91	Q1-1.5fs =	83	Q1-1.5fs =	91	Q1-1.5fs =	91	Q1-1.5fs =	90
Q3+1.5fs =	91	Q3+1.5fs =	94	Q3+1.5fs =	91	Q3+1.5fs =	91	Q3+1.5fs =	90

Tabla 14. Identificación de valores atípicos PCI 2013

Fuente: Elaboración propia

VALORES DEL DIAGRAMA DE CAJA - PCI 2013									
Sección:	101	Sección:	103	Sección:	105	Sección:	102	Sección:	104
Xmín=	63	Xmín=	58	Xmín=	58	Xmín=	58	Xmín=	58
Q1=	69	Q1=	58	Q1=	58	Q1=	61	Q1=	58
Q2=	69	Q2=	66	Q2=	63	Q2=	63	Q2=	58
Q3=	70	Q3=	69	Q3=	66	Q3=	66	Q3=	66
Xmáx=	70	Xmáx=	70	Xmáx=	70	Xmáx=	69	Xmáx=	69
fs =	1	fs =	11	fs =	8	fs =	5	fs =	8
Q1-1.5fs =	68	Q1-1.5fs =	42	Q1-1.5fs =	46	Q1-1.5fs =	54	Q1-1.5fs =	46
Q3+1.5fs =	72	Q3+1.5fs =	86	Q3+1.5fs =	78	Q3+1.5fs =	72	Q3+1.5fs =	78

Tabla 15. Identificación de valores atípicos PCI 2014

Fuente: Elaboración propia

VALORES DEL DIAGRAMA DE CAJA - PCI 2014								
Sección:	101	Sección:	103	Sección:	105			
Xmín=	79	Xmín=	81	Xmín=	78			
Q1=	82	Q1=	86	Q1=	84			
Q2=	84	Q2=	90	Q2=	85			
Q3=	86	Q3=	93	Q3=	87			
Xmáx=	88	Xmáx=	97	Xmáx=	90			
fs =	4	fs =	7	fs =	3			
Q1-1.5fs =	76	Q1-1.5fs =	76	Q1-1.5fs =	80			
Q3+1.5fs =	92	Q3+1.5fs =	104	Q3+1.5fs =	92			
Sección:	102	Sección:	104	Sección:	106			
Xmín=	79	Xmín=	84	Xmín=	79			
Q1=	85	Q1=	90	Q1=	84			
Q2=	86	Q2=	93	Q2=	87			
Q3=	92	Q3=	94	Q3=	89			
Xmáx=	93	Xmáx=	94	Xmáx=	93			
fs =	8	fs =	4	fs =	5			
Q1-1.5fs =	73	Q1-1.5fs =	84	Q1-1.5fs =	76			
Q3+1.5fs =	103	Q3+1.5fs =	100	Q3+1.5fs =	96			

Tabla 16. Identificación de valores atípicos PCI 2015

Fuente: Elaboración propia

VALORES DEL DIAGRAMA DE CAJA - PCI 2015								
Sección:	101	Sección:	103	Sección:	105			
Xmín=	75	Xmín=	75	Xmín=	78			
Q1=	80	Q1=	82	Q1=	81			
Q2=	83	Q2=	83	Q2=	83			
Q3=	83	Q3=	84	Q3=	83			
Xmáx=	84	Xmáx=	86	Xmáx=	86			
fs =	3	fs =	2	fs =	2			
Q1-1.5fs =	76	Q1-1.5fs =	79	Q1-1.5fs =	78			
Q3+1.5fs =	88	Q3+1.5fs =	87	Q3+1.5fs =	86			
Sección:	102	Sección:	104	Sección:	106			
Xmín=	75	Xmín=	78	Xmín=	74			
Q1=	79	Q1=	80	Q1=	80			
Q2=	82	Q2=	83	Q2=	83			
Q3=	84	Q3=	87	Q3=	84			
Xmáx=	86	Xmáx=	93	Xmáx=	89			
fs =	5	fs =	8	fs =	5			
Q1-1.5fs =	72	Q1-1.5fs =	68	Q1-1.5fs =	73			
Q3+1.5fs =	92	Q3+1.5fs =	98	Q3+1.5fs =	91			

Tabla 17. PCI 2013 sin valores atípicos

Fuente: Elaboración propia

VALORES DEL DIAGRAMA DE CAJA - PCI 2013 (FILTRADO)								
Sección:	101	Sección:	103	Sección:	105			
Xmín=	65	Xmín=	85	Xmín=	91			
Q1=	68	Q1=	87	Q1=	91			
Q2=	69	Q2=	90	Q2=	91			
Q3=	70	Q3=	90	Q3=	91			
Xmáx=	70	Xmáx=	83	Xmáx=	0			
fs =	2	fs =	3	fs =	0			
Q1-1.5fs =	65	Q1-1.5fs =	83	Q1-1.5fs =	91			
Q3+1.5fs =	73	Q3+1.5fs =	94	Q3+1.5fs =	91			
Sección:	102	Sección:	104	Sección:	106			
Xmín=	91	Xmín=	90	Xmín=	91			
Q1=	91	Q1=	90	Q1=	91			
Q2=	91	Q2=	90	Q2=	91			
Q3=	91	Q3=	90	Q3=	91			
Xmáx=	91	Xmáx=	90	Xmáx=	91			
fs =	0	fs =	0	fs =	0			
Q1-1.5fs =	91	Q1-1.5fs =	90	Q1-1.5fs =	91			
Q3+1.5fs =	91	Q3+1.5fs =	90	Q3+1.5fs =	91			

Tabla 18. PCI 2014 sin valores atípicos

Fuente: Elaboración propia

VALORES DEL DIAGRAMA DE CAJA - PCI 2014 (FILTRADO)								
Sección:	101	Sección:	103	Sección:	105			
Xmín=	79	Xmín=	81	Xmín=	79			
Q1=	82	Q1=	86	Q1=	84			
Q2=	84	Q2=	90	Q2=	85			
Q3=	86	Q3=	93	Q3=	87			
Xmáx=	88	Xmáx=	97	Xmáx=	90			
fs =	4	fs =	7	fs =	3			
Q1-1.5fs =	76	Q1-1.5fs =	76	Q1-1.5fs =	79			
Q3+1.5fs =	92	Q3+1.5fs =	104	Q3+1.5fs =	92			
Sección:	102	Sección:	104	Sección:	106			
Xmín=	79	Xmín=	84	Xmín=	79			
Q1=	85	Q1=	90	Q1=	84			
Q2=	86	Q2=	93	Q2=	87			
Q3=	92	Q3=	94	Q3=	89			
Xmáx=	93	Xmáx=	94	Xmáx=	93			
fs =	8	fs =	4	fs =	5			
Q1-1.5fs =	73	Q1-1.5fs =	84	Q1-1.5fs =	76			
Q3+1.5fs =	103	Q3+1.5fs =	100	Q3+1.5fs =	96			

Tabla 19. PCI 2015 sin valores atípicos

Fuente: Elaboración propia

VALORES DEL DIAGRAMA DE CAJA - PCI 2015 (FILTRADO)									
Sección:	101	Sección:	103	Sección:	105	Sección:	102	Sección:	104
Xmín=	76	Xmín=	79	Xmín=	78	Xmín=	75	Xmín=	78
Q1=	80	Q1=	82	Q1=	81	Q1=	79	Q1=	80
Q2=	83	Q2=	83	Q2=	83	Q2=	82	Q2=	83
Q3=	83	Q3=	84	Q3=	83	Q3=	84	Q3=	87
Xmáx=	84	Xmáx=	86	Xmáx=	86	Xmáx=	86	Xmáx=	93
fs =	3	fs =	2	fs =	2	fs =	5	fs =	8
Q1-1.5fs =	76	Q1-1.5fs =	79	Q1-1.5fs =	78	Q1-1.5fs =	72	Q1-1.5fs =	68
Q3+1.5fs =	88	Q3+1.5fs =	87	Q3+1.5fs =	86	Q3+1.5fs =	92	Q3+1.5fs =	98
Sección:	106	Sección:	104	Sección:	106	Sección:	102	Sección:	104
Xmín=	74	Xmín=	78	Xmín=	74	Xmín=	75	Xmín=	78
Q1=	80	Q1=	80	Q1=	80	Q1=	79	Q1=	80
Q2=	83	Q2=	83	Q2=	83	Q2=	82	Q2=	83
Q3=	84	Q3=	87	Q3=	84	Q3=	84	Q3=	87
Xmáx=	89	Xmáx=	93	Xmáx=	89	Xmáx=	86	Xmáx=	93
fs =	5	fs =	8	fs =	5	fs =	5	fs =	8
Q1-1.5fs =	73	Q1-1.5fs =	68	Q1-1.5fs =	73	Q1-1.5fs =	72	Q1-1.5fs =	68
Q3+1.5fs =	91	Q3+1.5fs =	98	Q3+1.5fs =	91	Q3+1.5fs =	92	Q3+1.5fs =	98

En la Tabla 20 se presenta el PCI por sección, obtenido de los valores PCI por unidad de muestra corregidos y/o filtrados, y en el Anexo 2 se presenta el detalle del PCI por unidad de muestra.

Tabla 20. Tabla resumen de PCI por sección, después de análisis de datos

Fuente: DGAC/ Elaboración Propia

Sección	Fecha de inspección	PCI	Clase
101	2007	91	RWY
	2013	68	RWY
	2014	83	RWY
	2015	81	RWY
102	2007	91	RWY
	2013	66	RWY
	2014	87	RWY
	2015	81	RWY
103	2007	89	RWY
	2013	64	RWY
	2014	89	RWY
	2015	82	RWY

Sección	Fecha de inspección	PCI	Clase
104	2007	90	RWY
	2013	61	RWY
	2014	91	RWY
	2015	83	RWY
105	2007	91	RWY
	2013	63	RWY
	2014	83	RWY
	2015	82	RWY
106	2007	91	RWY
	2013	63	RWY
	2014	83	RWY
	2015	81	RWY

4.2. REGRESIÓN LOGÍSTICA DE LOS DATOS HISTÓRICOS

Se cuenta con el total de las inspecciones PCI realizadas a la pista de aterrizaje del Aeropuerto de Cajamarca desde su construcción, con los resultados de las mencionadas inspecciones se realizará el proceso numérico de regresión no lineal logística descrito en el ítem 2.5.2, para obtener valores que posteriormente serán usados para calibrar la MPT para el desarrollo del modelo de Markov.

Es importante mencionar que, se desestimó elaborar la MPT en base al “criterio de expertos”, dado que con el método de regresión de datos históricos es posible obtener una mejor aproximación de los datos generados a los datos originales [Solorio et al., 2014]; asimismo, diversas investigaciones para la construcción de curvas maestras que representen el deterioro del pavimento como las realizadas por Pellinen et al. (2003) y Yusoff et al. (2012), han demostrado que la mejor función para su representación es la función logística.

$$PCI(t) = 100 \times \frac{e^{\beta_0 + \beta_1 t}}{1 + e^{\beta_0 + \beta_1 t}}$$

Ec. 10. Función logística - Representación matemática

Fuente: [Devore Jay, 2005].

En el Anexo 3, se presenta el cálculo del tamaño de la muestra mínima, con lo cual se verifica que las 04 inspecciones son suficientes para un universo de 20 (tiempo de vida útil de diseño del pavimento).

A continuación, se presenta la Tabla 21 que contiene los datos analizados y trabajados con el algoritmo de regresión no lineal del gradiente reducido generalizado, incluido en la herramienta Solver de Excel; que se emplea para optimizar una función objetivo, que en este caso será la mínima diferencia entre del PCI obtenido de la función Vs. PCI observado [Solorio et al., 2014].

Cabe resaltar que, al realizarse mantenimiento correctivo al pavimento en el año 2014, hubo un incremento en el PCI, por lo que su edad asumida inicialmente como “0” años será modificada con un Factor de Corrección, determinado como una de las variables del Solver.

Tabla 21. Datos - Herramienta Solver
Fuente: Elaboración Propia

Sección	Fecha de inspección	PCI	Edad	Edad corregida	PCI (t)	\min PCI(t) - PCI
101	2007	91	4	4	91	0
	2013	68	10	10	64	4
	2014	83	0	6	86	3
	2015	81	1	7	82	1
102	2007	91	4	4	91	0
	2013	66	10	10	64	2
	2014	87	0	6	86	1
	2015	81	1	7	82	1
103	2007	89	4	4	91	2
	2013	64	10	10	64	0
	2014	89	0	6	86	3
	2015	82	1	7	82	0
104	2007	90	4	4	91	1
	2013	61	10	10	64	3
	2014	91	0	6	86	5
	2015	83	1	7	82	1
105	2007	91	4	4	91	0
	2013	63	10	10	64	1
	2014	83	0	6	86	3
	2015	82	1	7	82	0
106	2007	91	4	4	91	0
	2013	63	10	10	64	1
	2014	83	0	6	86	3
	2015	81	1	7	82	1

Donde:

Edad : Año de inspección - Año de construcción o última intervención

Edad corregida : Edad + Factor de corrección (sólo si se identifica intervención)

PCI : PCI obtenido de la inspección

PCI (t) : PCI obtenido de $100 \times \frac{e^{\beta_0 + \beta_1 t}}{1 + e^{\beta_0 + \beta_1 t}}$

$\min | \text{PCI}(t) - \text{PCI} |$: Función objetivo de la herramienta Solver

Obteniendo la función:

$$PCI(t) = 100 \times \frac{e^{3.4 - 0.3t}}{1 + e^{3.4 - 0.3t}}$$

Ec. 11. Función logística obtenida con solver

Fuente: Elaboración propia

Siendo el Factor de Corrección de la edad igual a 6 años para las inspecciones realizadas después del mantenimiento del año 2014.

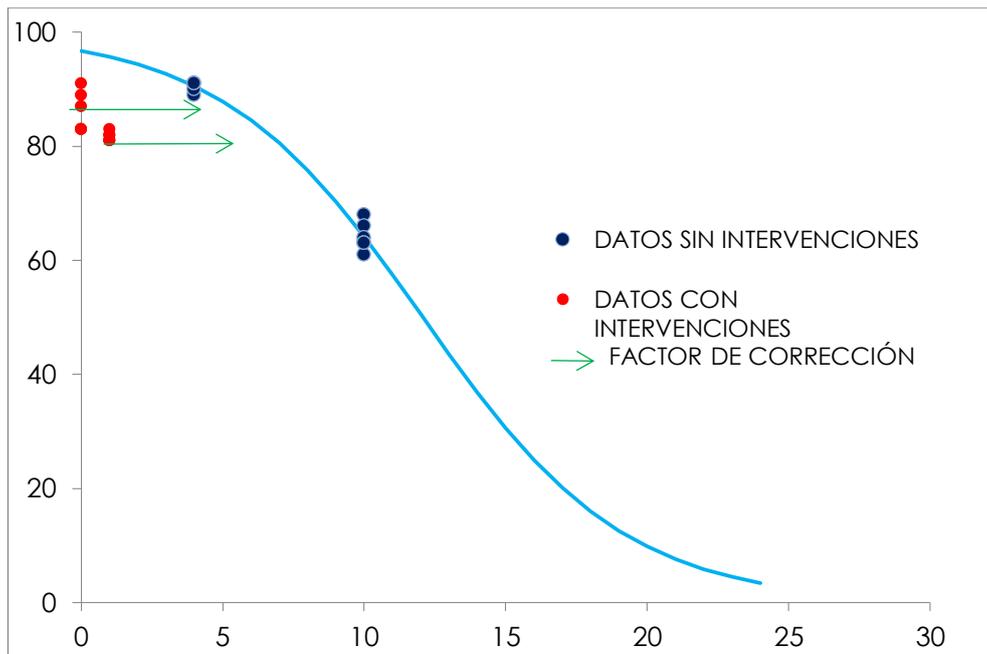


Figura 24. PCI vs Edad - Pista de aterrizaje del Aeropuerto de Cajamarca

Fuente: Elaboración propia

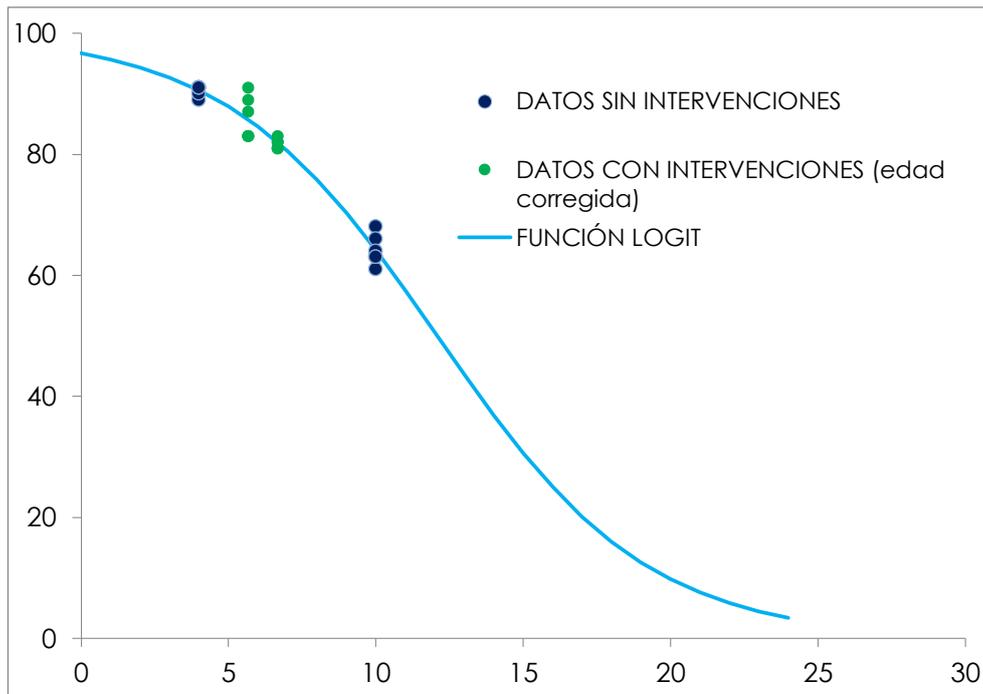


Figura 25. PCI vs Edad (corregida)- Pista de aterrizaje del Aeropuerto de Cajamarca
Fuente: Elaboración propia

4.3. MODELO NUMÉRICO CUANTITATIVO (CADENAS DE MARKOV)

Se estimará la MPT a partir de la regresión no lineal logística de los datos históricos realizada en el ítem 2.5.1

$$\bar{E}_{(0)} = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$$

Ec. 12. Vector de estado para el ciclo de servicio "0"

Fuente: [Butt et al., 1994]

$$\bar{E}_{(t)} = \bar{E}_{(0)} \times \bar{P}^t$$

Ec. 13. Cálculo de vectores de estado

Fuente: [Butt et al., 1994]

Con el algoritmo de regresión no lineal del gradiente reducido generalizado, incluido en la herramienta Solver de Excel, teniendo como función objetivo la mínima diferencia entre el PCI obtenido con la función logística (Ec. 11) Vs. PCI obtenido con la cadena de Markov y, como restricción que la suma de la probabilidad de que el pavimento se mantenga o de que pase al siguiente estado sea igual a 1 ($p_i + p_{i+1} = 1$) [Solorio et al., 2014]; se obtiene los datos mostrados a continuación:

$$\bar{P} = \begin{bmatrix} 81\% & 19\% & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 71\% & 29\% & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 56\% & 44\% & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 37\% & 63\% & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 5\% & 95\% & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\% & 100\% & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\% & 100\% & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\% & 100\% & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\% & 100\% \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 100\% \end{bmatrix}$$

Ec. 14. Matriz de Probabilidades de Transición con fines de SGPA

Fuente: Elaboración propia

De reemplazar las Ec. 12 y Ec. 14 en Ec. 13 se obtiene la tabla:

Tabla 22. Vectores de estado y PCI obtenidos con modelo numérico

Fuente: Elaboración propia

Edad (años)	Vector de estado (%)										PCI
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	
0	100.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100
1	81.3	18.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	98
2	66.1	28.4	5.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	96
3	53.7	32.4	11.4	2.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	94
4	43.7	33.0	15.9	6.0	1.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	91
5	35.5	31.5	18.5	9.3	3.8	1.4	0.0	0.0	0.0	0.0	88
6	28.9	28.9	19.5	11.7	6.0	3.6	1.4	0.0	0.0	0.0	85
7	23.5	25.8	19.3	13.0	7.6	5.7	3.6	1.4	0.0	0.0	81
8	19.1	22.6	18.3	13.4	8.6	7.2	5.7	3.6	1.4	0.0	76
9	15.5	19.6	16.8	13.1	8.9	8.1	7.2	5.7	3.6	1.4	71
10	12.6	16.7	15.1	12.4	8.7	8.4	8.1	7.2	5.7	5.1	65
11	10.3	14.2	13.3	11.3	8.2	8.2	8.4	8.1	7.2	10.7	59
12	8.3	11.9	11.6	10.1	7.5	7.8	8.2	8.4	8.1	18.0	53
13	6.8	10.0	9.9	8.9	6.7	7.1	7.8	8.3	8.4	26.1	47
14	5.5	8.3	8.5	7.7	5.9	6.4	7.1	7.8	8.2	34.5	42
15	4.5	6.9	7.1	6.6	5.2	5.6	6.4	7.2	7.8	42.7	37
16	3.6	5.7	6.0	5.6	4.4	4.9	5.6	6.4	7.1	50.5	33
17	3.0	4.7	5.0	4.8	3.8	4.2	4.9	5.6	6.4	57.6	30
18	2.4	3.9	4.2	4.0	3.2	3.6	4.2	4.9	5.6	64.0	26
19	2.0	3.2	3.5	3.3	2.7	3.0	3.6	4.2	4.9	69.7	24
20	1.6	2.6	2.9	2.8	2.2	2.5	3.0	3.6	4.2	74.5	21

Con los datos de la Tabla 22 (Edad y PCI), se obtiene la gráfica del modelo numérico cuantitativo que representa el comportamiento de un pavimento con características y condiciones similares a la pista de aterrizaje del Aeropuerto de Cajamarca (ver Figura 26), donde el rango del PCI para cada estado es mostrado en la Tabla 7.

Asimismo, la Tabla 23 presenta el resumen del deterioro del pavimento en un ciclo de servicio para un pavimento sometido a condiciones similares al caso de estudio.

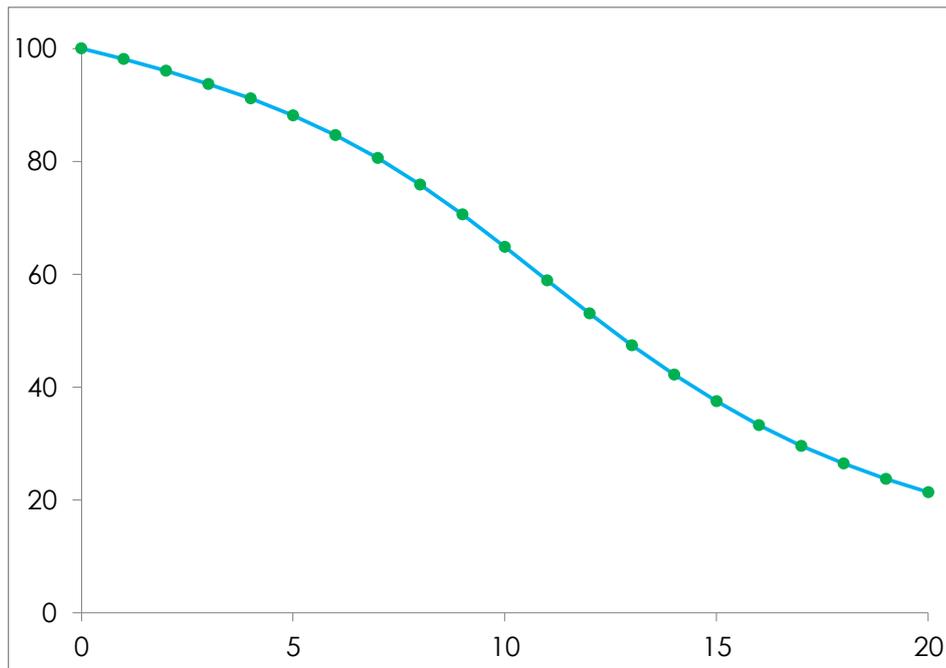


Figura 26. PCI vs Edad – Datos obtenidos del modelo
Fuente: Elaboración propia

Tabla 23. Probabilidad de que el pavimento cambie o se mantenga en su estado
Fuente: Elaboración propia

Condición Actual	Condición Futura	p_{ij}
A	A	81%
	B	19%
B	B	71%
	C	29%
C	C	56%
	D	44%
D	D	37%
	E	63%
E	E	5%
	F	95%
F	F	0%
	G	100%
G	G	0%
	H	100%
H	H	0%
	I	100%
I	I	0%
	J	100%
J	J	100%

CAPÍTULO V: VALIDACIÓN DE LA HIPÓTESIS

5.1. PROPUESTA DE SISTEMA DE GESTIÓN DE PAVIMENTOS

AEROPORTUARIOS

En la Figura 27 se puede identificar la ineficiencia de realizar intervenciones a los pavimentos sin retroalimentación de la base de datos y sin una evaluación económica que optimice recursos durante el ciclo de vida útil de los pavimentos de un aeropuerto.

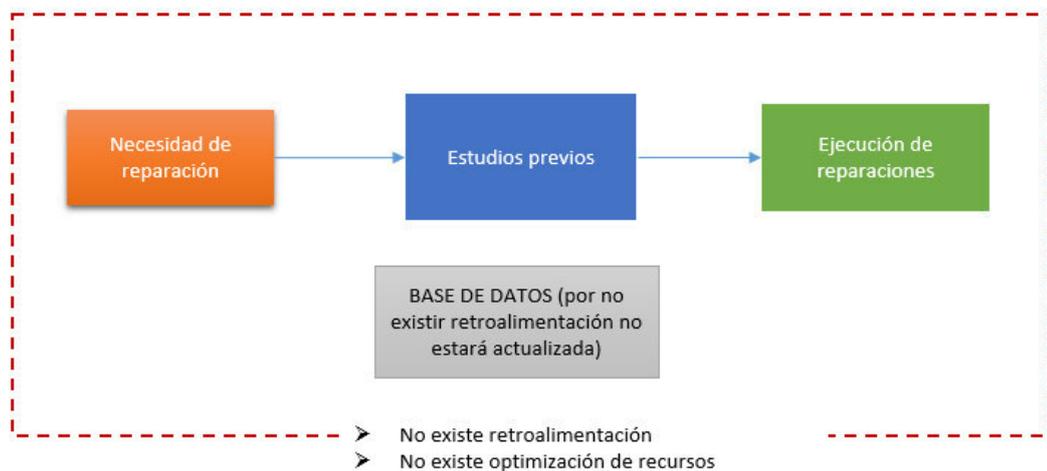


Figura 27. Propuesta sin SGPA

Fuente: [DGAC] y Elaboración propia

De lo desarrollado en la presente investigación, se propone la implementación de un SGPA siguiendo los lineamientos desarrollados en el Capítulo II, cuyo diagrama de flujo es mostrado en la Figura 28 (ver detalle en el Anexo 5).

Para ilustrar el proceso de implementación del SGPA propuesto, se desarrolló el caso aplicativo, para el subsistema “Pista de aterrizaje” del aeropuerto de Cajamarca, el cual presenta todas las etapas de la gestión:

- ✓ Base de datos: Ver Capítulo III
- ✓ Modelo numérico: Ver Capítulo IV
- ✓ Alternativas de M&R: Ver ítem 5.4
- ✓ Evaluación económica: Ver ítem 5.5
- ✓ Plan de M&R: Ver ítem 5.5

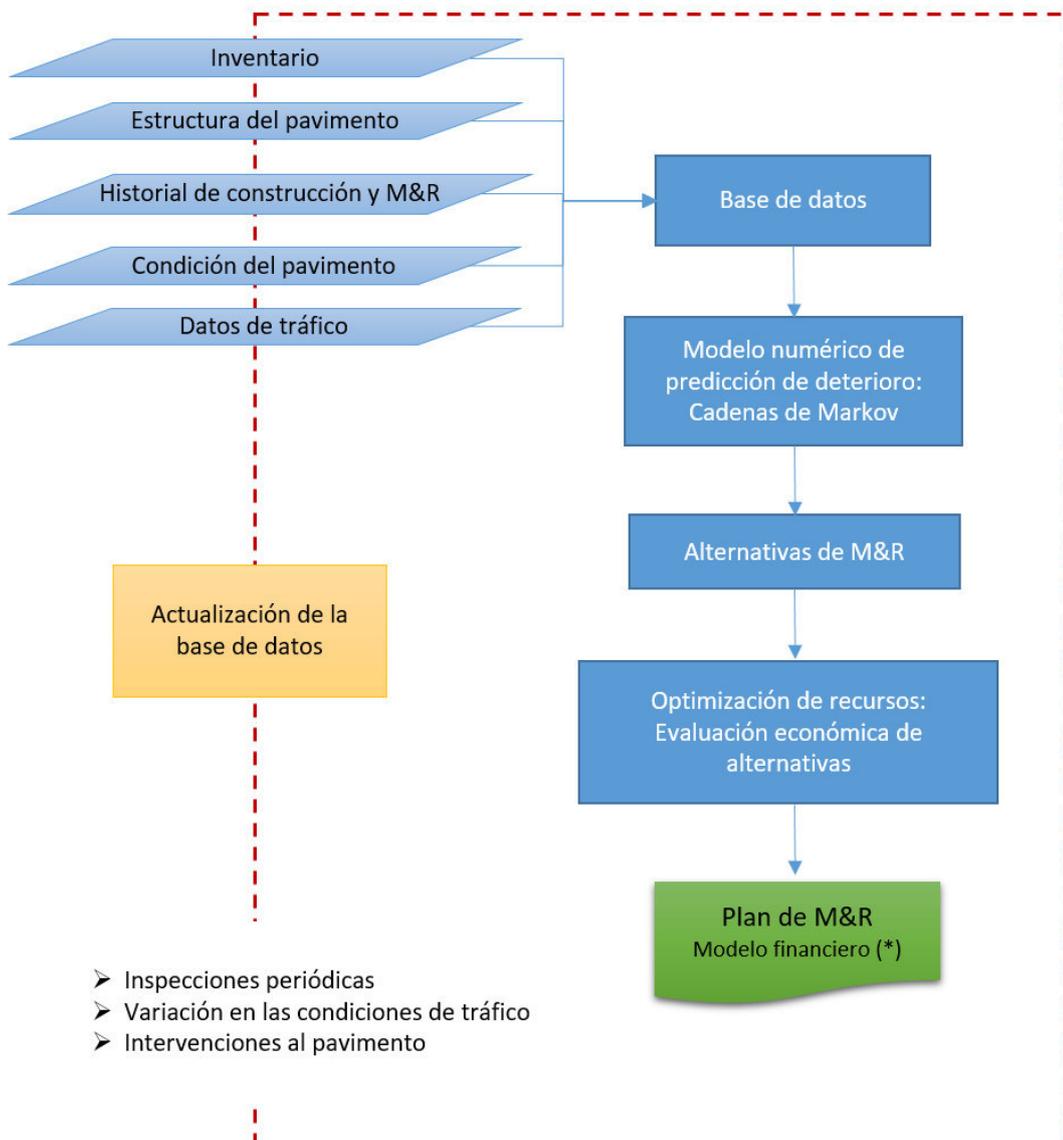


Figura 28. Propuesta con SGPA (ver detalle en Anexo 5)

Fuente: [FAA, 2014a] y Elaboración propia

(*) Es importante mencionar que, no se presenta el análisis financiero; dado que, determinar los ingresos y egresos del aeropuerto no es parte de la presente investigación, por la tanto la presente investigación tiene limitaciones financieras.

5.2. VERIFICACIÓN DEL PRONÓSTICO

En aplicación de la Ec. 3, con valores de la Tabla 20, se obtiene el PCI total de la pista de aterrizaje del aeropuerto de Cajamarca.

Tabla 24. PCI - Pista de aterrizaje del Aeropuerto de Cajamarca
 Fuente: DGAC/ Elaboración Propia

Año	Actividad	PCI
2003	ampliación y mejoramiento	--
2007	inspección superficial	91
2013	inspección superficial	65
2014	mantenimiento correctivo	--
2014	inspección superficial	86
2015	inspección superficial	82

La pista de aterrizaje del aeropuerto de Cajamarca fue ampliada y mejorada en el año 2003, año que tomaremos como la edad "0" (ciclo de servicio "0").

Entre los años 2003 – 2007 no se realizó intervención alguna en los pavimentos, en razón a ello, se validará el modelo con el dato del año 2007 PCI = 90.

Reemplazando en la Ec. 13, con los datos del año 2007 (edad 4 años).

$$\bar{E}_{(4)} = [100\% \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0] \times \begin{bmatrix} 81\% & 19\% & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 71\% & 29\% & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 56\% & 44\% & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 37\% & 63\% & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 5\% & 95\% & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\% & 100\% & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\% & 100\% & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\% & 100\% & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\% & 100\% \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 100\% \end{bmatrix}^4$$

$$\bar{E}_{(4)} = [43.7\% \ 33.0\% \ 15.9\% \ 6.0\% \ 1.5\% \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$$

Ec. 15. Vector de estado para el ciclo de servicio "4"

Fuente: Elaboración propia

Entonces el cálculo del PCI para el ciclo de servicio 4 resulta:

$$\text{PCI } (\bar{E}_{(4)}) = 43.7\%(100) + 33.0\%(90) + 15.9\%(80) + 6.0\%(70) + 1.5\%(60) + \\ 0\%(50) + 0\%(40) + 0\%(30) + 0\%(20) + 0\%(10) = 91$$

Comparando PCI para el ciclo de servicio 4 y el PCI obtenido de la inspección de campo 2007:

$$\text{PCI } (\bar{E}_{(4)}) = 91 = \text{PCI}_{(2007)} = 91 \quad \mathbf{OK}$$

De manera análoga calculamos el PCI para el ciclo de servicio 10 y el PCI obtenido de la inspección de campo 2013:

$$\text{PCI } (\bar{E}_{(10)}) = 65 = \text{PCI}_{(2013)} = 65 \quad \mathbf{OK}$$

En la Tabla 22 del Capítulo IV, del presente trabajo se muestran los vectores de estado y PCI calculados para los ciclos de servicio 1 al 20. Se realizan los cálculos para 20 ciclos de servicio, dado que, los pavimentos aeroportuarios son diseñados para un ciclo de vida útil de 20 años [DGAC, 2017].

5.3. COSTO vs ESTADO DE DETERIORO

En la Tabla 25, se muestran los costos de intervenciones de mantenimiento a los pavimentos, producto de una recopilación de datos que maneja la DGAC, los ítems presentados incluyen costos de movilización de equipos y transporte de materiales como sub partidas (ver Apéndice 2).

Tabla 25. Costos de intervenciones de mantenimiento en pavimentos.

Fuente: [DGAC], Elaboración propia

ACTIVIDAD	UNIDAD	COSTO DIRECTO
MANTENIMIENTO PREVENTIVO RUTINARIO		
LIMPIEZA DE PAVIMENTO ASFÁLTICO	M2	\$ 2.38
MANTENIMIENTO PREVENTIVO PERIÓDICO		
SELLADO DE FISURAS Y GRIETAS	M	\$ 9.50
IMPERMEABILIZACIÓN CONTRA DERRAMES	M2	\$ 16.53
SLURRY ASFÁLTICO SUPERFICIAL	M2	\$ 10.78
REPOSICIÓN DE PINTURA O SEÑALIZACIÓN	M2	\$ 13.85
MANTENIMIENTO CORRECTIVO		
SELLADO DE FISURAS Y GRIETAS	M	\$ 9.50
RECAPEO 1" EN PAVIMENTOS CON SUPERFICIES ASFÁLTICAS	M2	\$ 24.83
REPOSICIÓN DE PINTURA O SEÑALIZACIÓN	M2	\$ 13.85

Nota: Ver análisis de costos unitarios en el ver Apéndice 2

Estos costos serán usados, para realizar una comparación de costos con y sin M&R. Cabe mencionar que, los costos referenciales para las situaciones de rehabilitación y reconstrucción se obtendrán de presupuestos de estudios definitivos de ingeniería aprobados por la DGAC.

A continuación, se presenta el análisis de una unidad de muestra (UM), asignando las fallas predominantes que presenta el pavimento en estudio, variando el grado de severidad; que será de utilidad para el cálculo del costo promedio por metro cuadrado (\$/m²) de intervenciones de mantenimiento a los pavimentos; mientras que, los costos referenciales para las situaciones de rehabilitación y reconstrucción se obtendrán de presupuestos de estudios definitivos de ingeniería aprobados por la DGAC.

El citado análisis se realizó siguiendo el procedimiento descrito en el ítem 2.3.4 (ASTM D5340-12), considerando un tamaño de unidad de muestra de 450 m².

Tabla 26. Análisis de UM para los distintos estados de deterioro.

Fuente: Elaboración propia, imágenes de internet.

UM (área = 450m ²)	TIPO DE DETERIORO REGISTRADO			VR	PCI	CONDICIÓN DEL PAVIMENTO FLEXIBLE	
	Severidad	Piel de cocodrilo	Fisuras long.				Peladura
		1	8				12
A-01	L		10	30	8	92	BUENO
	M						
	H						



UM (área = 450m ²)	TIPO DE DETERIORO REGISTRADO				VR	PCI	CONDICIÓN DEL PAVIMENTO FLEXIBLE
	Severidad	Piel de cocodrilo	Fisuras long.	Peladura			
		1	8	12			
B-01	L		60	150	22	78	SATISFACTORIO
	M			25			
	H						



UM (área = 450m ²)	TIPO DE DETERIORO REGISTRADO				VR	PCI	CONDICIÓN DEL PAVIMENTO FLEXIBLE
	Severidad	Piel de cocodrilo	Fisuras long.	Peladura			
		1	8	12			
C-01	L		90	75	35	65	ACEPTABLE
	M			100			
	H						



UM (área = 450m ²)	TIPO DE DETERIORO REGISTRADO				VR	PCI	CONDICIÓN DEL PAVIMENTO FLEXIBLE
	Severidad	Piel de cocodrilo	Fisuras long.	Peladura			
		1	8	12			
D-01	L			20	54	46	POBRE
	M	15	40	120			
	H						



UM (área = 450m ²)	TIPO DE DETERIORO REGISTRADO				VR	PCI	CONDICIÓN DEL PAVIMENTO FLEXIBLE
	Severidad	Piel de cocodrilo	Fisuras long.	Peladura			
		1	8	12			
E-01	L				62	38	MUY POBRE
	M	50	70	50			
	H						



UM (área = 450m ²)	TIPO DE DETERIORO REGISTRADO				VR	PCI	CONDICIÓN DEL PAVIMENTO FLEXIBLE
	Severidad	Piel de cocodrilo	Fisuras long.	Peladura			
		1	8	12			
F-01	L				82	18	SERIO
	M			50			
	H	50	80	50			



UM (área = 450m ²)	TIPO DE DETERIORO REGISTRADO				VR	PCI	CONDICIÓN DEL PAVIMENTO FLEXIBLE
	Severidad	Piel de cocodrilo	Fisuras long.	Peladura			
		1	8	12			
G-01	L				95	5	FALLA
	M						
	H	150	180	120			



A continuación, de lo descrito en el ítem 2.4 y la cantidad de deterioro por UM (ver Tabla 26); se presenta el cálculo del costo por metro cuadrado (ratio), de realizar intervenciones en los distintos estados de deterioro.

Tabla 27. Costo de intervención de M&R por metro cuadrado

Fuente: [DGAC], Elaboración propia

Costo de intervención de M&R por metro cuadrado

UM	TRATAMIENTOS/INTERVENCIONES	UND.	CANT.	COSTO UNIT. (\$)	COSTO PARCIAL (\$)	RATIO (\$/M2)
A-01	MANTENIMIENTO PREVENTIVO				2,851.88	7.00
	SELLADO DE FISURAS Y GRIETAS	M	10	9.50	95.00	
	IMPERMEABILIZACIÓN CONTRA DERRAMES	M2	150	16.53	2,479.82	
	REPOSICIÓN DE PINTURA O SEÑALIZACIÓN	M2	20	13.85	277.07	
B-01	MANTENIMIENTO PREVENTIVO				6,254.19	14.00
	SELLADO DE FISURAS Y GRIETAS	M	60	9.50	570.00	
	SLURRY ASFÁLTICO SUPERFICIAL	M2	450	10.78	4,852.99	
	REPOSICIÓN DE PINTURA O SEÑALIZACIÓN	M2	60	13.85	831.20	
C-01	MANTENIMIENTO CORRECTIVO				12,858.13	29.00
	SELLADO DE FISURAS Y GRIETAS	M	90	9.50	854.99	
	RECAPEO 1" EN PAVIMENTOS CON SUPERFICIES A:	M2	450	24.83	11,171.93	
	REPOSICIÓN DE PINTURA O SEÑALIZACIÓN	M2	60	13.85	831.20	
D-01	REHABILITACIÓN (*)					65.00
E-01	REHABILITACIÓN O RECONSTRUCCIÓN (**)					110.00
F-01/ G-01	RECONSTRUCCIÓN (***)					161.00

(*) Ratio obtenido del Proyecto " Rehabilitación de los Pavimentos del Aeropuerto de Jauja", Costo directo en pavimento de pista de aterrizaje (30m x 2500m) 4.9 MM\$ [DGAC, 2016]

(**) Ratio obtenido del Proyecto " Mejoramiento del Sistema de Pistas del Aeropuerto de Chiclayo". Costo directo en pavimento de pista de aterrizaje (45mx2520m) 12.5 MM\$ [DGAC, 2017]

(***) Ratio obtenido del Proyecto " Aeropuerto Internacional de Chinchero - Cusco". Costo directo en pavimento de pista de aterrizaje (45mx4000m) 29.0 MM\$ [DGAC, 2017]

En resumen, se tienen los siguientes costos promedio por metro cuadrado (costo directo), para intervenciones en los distintos estados de deterioro:

Tabla 28. Costos de tratamientos / intervenciones para un pavimento en Perú
Fuente: [Hajek et al., 2011], [Freeman et al., 2016], DGAC, Elaboración propia

CALIFICACIÓN PCI		DESCRIPCIÓN	TRATAMIENTOS / INTERVENCIONES APLICABLES	COSTO (\$/m ²)
86 - 100	BUENO	Presenta sólo fallas menores	Mantenimiento preventivo	7
71 - 85	SATISFACTORIO	Presenta fallas leves y medias	Mantenimiento preventivo	14
56 - 70	ACEPTABLE	Presenta algunas fallas severas	Mantenimiento correctivo	29
41 - 55	POBRE	La severidad de algunas fallas pueden ocasionar problemas operacionales	Rehabilitación	65
26 - 40	MUY POBRE	Las fallas severas ocasionan problemas operacionales	Rehabilitación o reconstrucción	110
11 - 25	SERIO	Las fallas severas ocasionan restricciones operacionales	Reparaciones inmediatas y reconstrucción	161
0 - 10	FALLA	El deterioro de pavimento impide operaciones seguras de aeronaves	Reconstrucción	161

En la Figura 29 se presenta una ilustración de la curva del modelo desarrollado en el Capítulo IV y los costos promedio para intervenciones en los distintos estados de deterioro (ver Tabla 28), para un pavimento aeroportuario con características y condiciones similares al aeropuerto de Cajamarca.



Figura 29. PCI vs Edad – Costos asociados M&R
Fuente: Elaboración propia

De la ilustración anterior, se aprecia que la diferencia entre los costos asociados a estrategias de M&R varían considerablemente para los distintos estados de deterioro.

5.4. SITUACIÓN FUTURA CON Y SIN M&R

5.4.1. Situación futura sin mantenimiento

Como ya se mencionó anteriormente, los pavimentos aeroportuarios en el Perú se diseñan para una vida útil de 20 años [DGAC, 2017], es así que, para evaluar la condición futura sin mantenimiento al término de su vida útil, se someterá a 20 ciclos de servicio en el modelo desarrollado en el Capítulo IV.

Resultando PCI ($\bar{E}_{(20)}$) = 21 (ver Tabla 22), calificación que indica un estado de deterioro serio y requiere rehabilitación o reconstrucción, cuyo costo³ es \$110/m² (ver Figura 29).

A continuación, se presenta la Figura 30, donde se grafica la curva modelo al término de la vida útil de diseño de un pavimento (20 años) y, la reconstrucción, donde el PCI del pavimento vuelve a ser 100 en el “nuevo ciclo de servicio 0” (año 20).

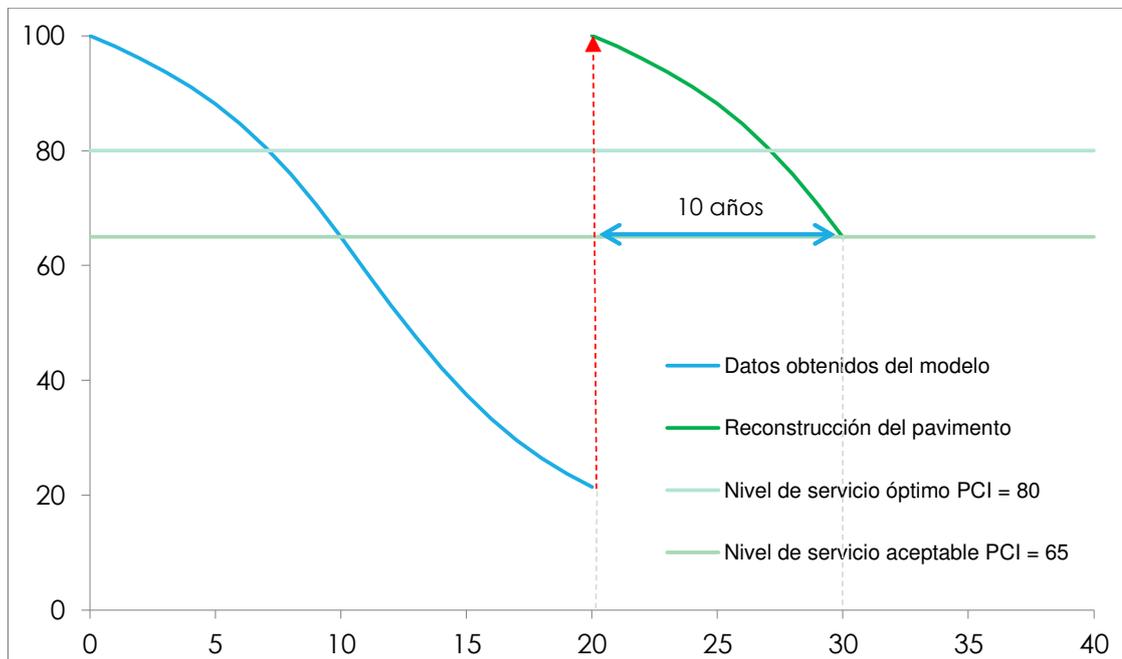


Figura 30. PCI vs Edad – Sin mantenimiento

Fuente: Elaboración propia

³ En el ítem 5.5 se estimará el presupuesto considerando que, al ser una intervención en el año 20, se debe calcular el valor futuro.

La curva de la reconstrucción es analizada hasta llegar al nivel de servicio mínimo aceptable del pavimento $PCI = 65$ (ver Tabla 6), que resulta de ser sometido a 10 ciclos de servicio (ver Tabla 22).

Cabe resaltar que, al no realizar intervenciones hasta el año 20, se pone en riesgo la seguridad operacional de las aeronaves, desde el año 10 al año 20, donde el PCI es inferior al mínimo aceptable. En tal razón, esta situación no será considerada como alternativa para el desarrollo del Plan de M&R del SGPA.

5.4.2. Situación futura con mantenimiento correctivo

De los datos de la pista de aterrizaje del aeropuerto de Cajamarca (ver Tabla 24), se sabe que, en el 2014 (edad del pavimento: 11 años) se realizaron intervenciones de mantenimiento correctivo, así como, una inspección del estado del pavimento en el mismo año $PCI_{(2014)} = 86$.

Con el modelo desarrollado en el Capítulo IV se obtiene $PCI(\bar{E}_{(11)}) = 59$, como resultado de someter a 11 ciclos de servicio el pavimento (ver Tabla 22).

En consecuencia, es posible determinar en cuantos puntos mejora la calificación PCI con una intervención de mantenimiento correctivo, de la siguiente manera:

$$PCI_{(2014)} - PCI(\bar{E}_{(11)}) = 86 - 59 = 27$$

Es importante mencionar que, evaluar cuántos puntos PCI sube el estado del pavimento después de una intervención no es parte de la presente investigación, por la tanto es una limitación.

A continuación, se presenta la Figura 31, donde se grafica la curva modelo hasta llegar a un $PCI = 59$ (ver Tabla 22), donde se interviene con mantenimiento correctivo (ver Tabla 28) y, las curvas después del mantenimiento correctivo, donde el PCI del pavimento vuelve a ser 86 los “nuevos ciclo de servicio 6” (años 11 y 16)⁴.

⁴ En el ítem 5.5 se estimará el presupuesto considerando que, el mantenimiento correctivo corresponde a los años 11 y 16; y se debe calcular el valor futuro.

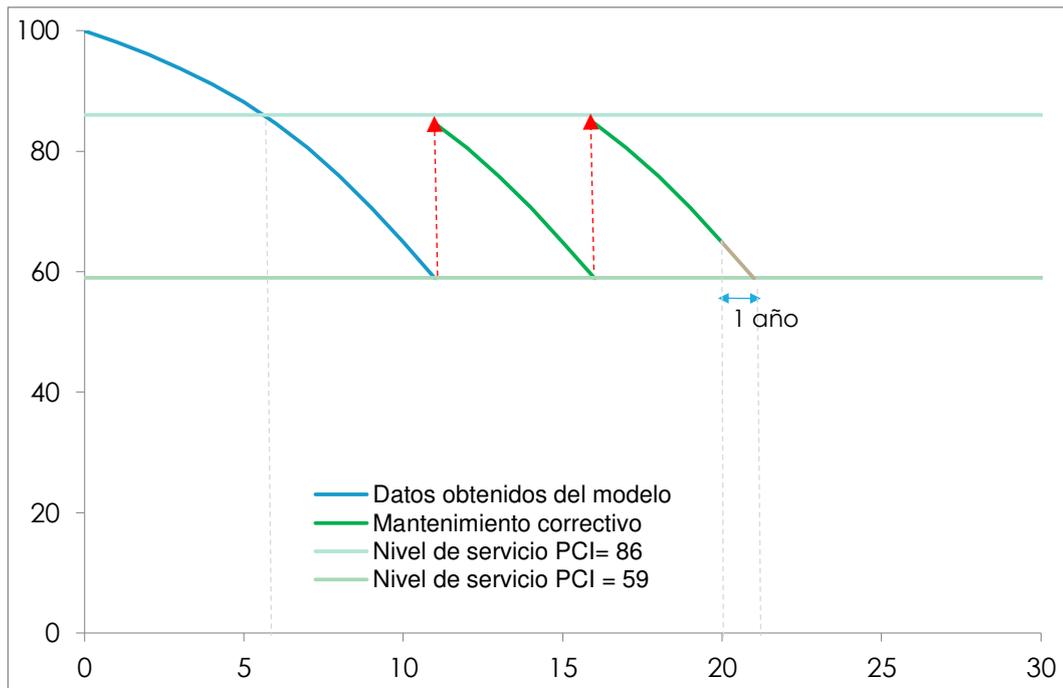


Figura 31. PCI vs Edad – Con mantenimiento correctivo
 Fuente: Elaboración propia

Se analiza el pavimento al término de su vida útil, para poder realizar una comparación con los otros casos de M&R. Cabe mencionar que, el pavimento cumple su vida útil con un PCI = 71 (año 20), prolongando el servicio 01 año hasta llegar al nivel de servicio mínimo aceptable (PCI=65).

5.4.3. Situación futura con mantenimiento preventivo

El mantenimiento preventivo es el tipo de intervención que se debería realizar, a fin de evitar un deterioro que conlleve a intervenciones mayores, tales como mantenimiento correctivo o una rehabilitación.

Al no contar con datos experimentales de cuántos puntos PCI mejora la condición del pavimento al realizar mantenimiento preventivo, asumiremos que al realizar la intervención cuando el PCI es 71 (antes de caer a una calificación PCI que requiera mantenimiento correctivo, ver Tabla 28), el PCI mejora a un PCI = 85 y mantiene su calificación satisfactoria, es decir mejora en 15 puntos.

Es importante mencionar que, evaluar cuántos puntos PCI sube el estado del pavimento después de una intervención no es parte de la presente investigación, por la tanto es una limitación.

A continuación, se presenta la Figura 32, donde se grafica la curva modelo hasta un PCI = 71, donde se debe intervenir con mantenimiento preventivo (ver Tabla 28) y, las curvas después del mantenimiento preventivo, donde el PCI del pavimento vuelve a ser 85, en los años 9, 12, 15 y 18⁵.

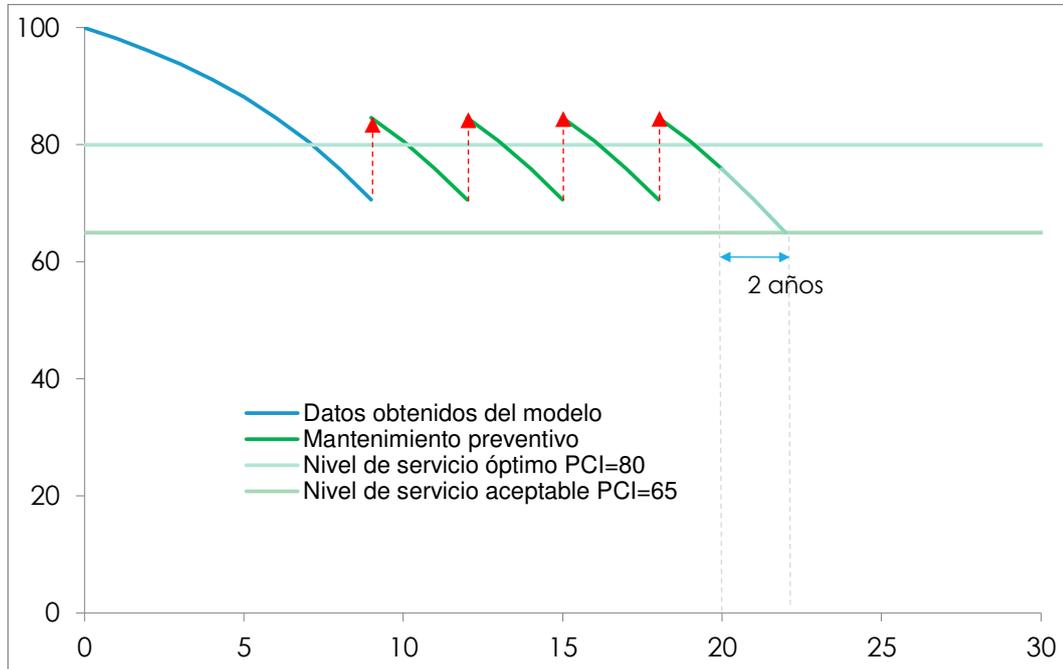


Figura 32. PCI vs Edad – Con mantenimiento preventivo

Fuente: Elaboración propia

Se analiza el pavimento al término de su vida útil, para poder realizar una comparación con los otros casos de M&R. Cabe mencionar que, el pavimento cumple su vida útil con un PCI = 76 (año 20), prolongando el servicio 02 años hasta llegar al nivel de servicio mínimo aceptable (PCI=65).

⁵ En el ítem 5.6 se estimará el presupuesto considerando que, el mantenimiento preventivo corresponde a los años 9, 12, 15 y 18; y se debe calcular el valor futuro.

Otras alternativas con mantenimiento preventivo

Como se mencionó anteriormente, no se cuenta con datos experimentales de cuantos puntos PCI mejora la condición del pavimento al realizar mantenimiento preventivo. Éstas curvas se podrán determinar una vez implementado el SGPA, dado que existirá retroalimentación.

En tal sentido, considerando lo antes mencionado, para el análisis comparativo de situaciones con/sin M&R, la propuesta de mantenimiento preventivo será representada por la alternativa cada 3 años, dado que, es una alternativa conservadora.

No obstante, se presenta la gráfica de realizar intervenciones para conservar el pavimento en óptimas condiciones durante su vida útil (PCI mayor o igual a 80). Para ello se programa actividades de mantenimiento preventivo cada 2 años, a partir del año 4 (PCI=91) y, se asume que, el pavimento mejora como mínimo en 5 puntos.

Es importante mencionar que, evaluar cuántos puntos PCI sube el estado del pavimento después de una intervención no es parte de la presente investigación, por la tanto es una limitación.

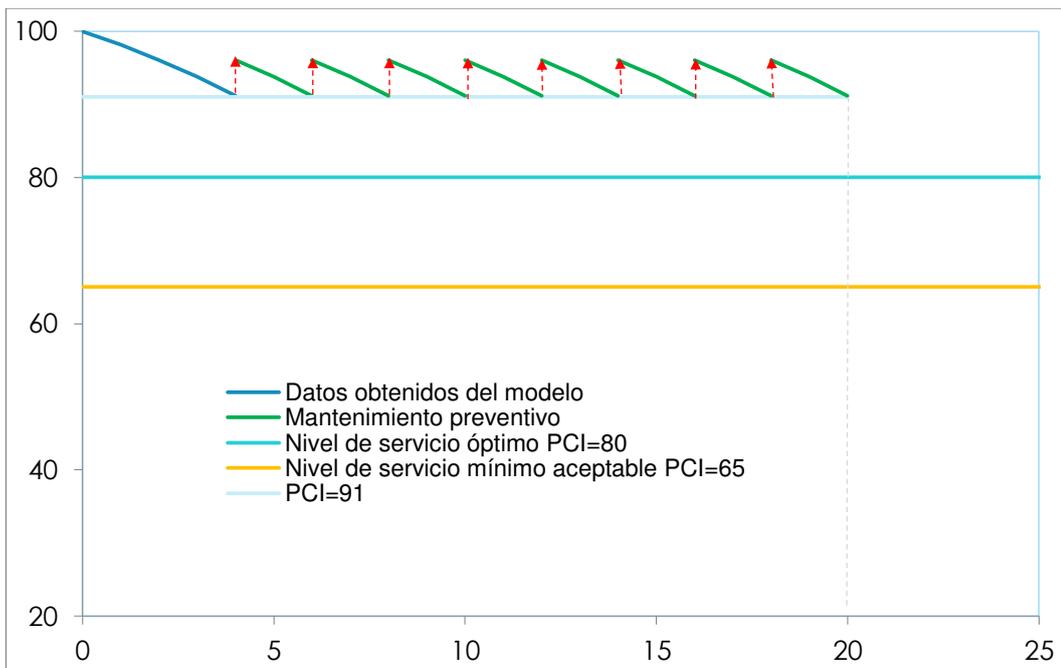


Figura 33. PCI vs Edad – Otras alternativas con mantenimiento preventivo

Fuente: Elaboración propia

5.5. EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS

Con la finalidad de realizar la evaluación económica de las alternativas presentadas en el ítem 5.4; se asume que el análisis se realiza al inicio del ciclo de vida útil del pavimento,

A continuación, considerando la inflación⁶ (ver Tabla 29) se calculará el presupuesto de las intervenciones para los años programados; asimismo, se aplicará la tasa social de descuento de los proyectos de inversión pública en el Perú (8%)⁷ a los presupuestos obtenidos y se convertirán a Valor Actual; de esta manera, se podrá comparar y conocer la alternativa más rentable durante la vida útil del pavimento y los años que ésta pueda ser extendida.

Tabla 29. Reporte de Inflación del Banco Central de Reserva del Perú (BCRP) - Setiembre 2017

Fuente: [BCRP,2017]

INFLACIÓN (Variaciones porcentuales)								
	Peso	2012	2013	2014	2015	2016	2017	
							Ene.-Ago.	12 meses
IPC	100,0	2,65	2,86	3,22	4,40	3,23	1,90	3,17
1. IPC sin alimentos y energía	56,4	1,91	2,97	2,51	3,49	2,87	1,80	2,57
a. Bienes	21,7	1,60	2,62	2,43	3,57	3,41	1,07	1,66
b. Servicios	34,8	2,10	3,18	2,55	3,44	2,54	2,25	3,14
2. Alimentos y energía	43,6	3,55	2,73	4,08	5,47	3,66	2,01	3,87
a. Alimentos y bebidas	37,8	4,06	2,24	4,83	5,37	3,54	2,62	4,13
b. Combustibles y electricidad	5,7	0,22	6,09	-0,85	6,20	4,48	-2,16	2,03
Combustibles	2,8	-1,48	5,95	-5,59	-6,33	0,61	0,56	4,14
Electricidad	2,9	2,19	6,23	4,37	18,71	7,53	-4,16	0,45

En la Tabla 30, Tabla 31 y Tabla 32 se presenta las inversiones requeridas para la situación sin mantenimiento y las alternativas 1 y 2.

⁶ Los datos de inflación de los 5 últimos años tienen un comportamiento normal (ver Anexo 5), por lo tanto, para el análisis se considerará la media (2.75 %).

⁷ Reglamento del Decreto Legislativo N° 1252 que crea el Sistema Nacional de Programación Multianual y Gestión de Inversiones, aprobado con Decreto Supremo N° 027-2017-EF.

✓ **Sin mantenimiento:**

Como se mencionó en el ítem 5.4.1, esta situación no será considerada como alternativa para el desarrollo del Plan de M&R del SGPA, dado que, se pone en riesgo la seguridad operacional de las aeronaves, en los años donde el PCI es inferior al mínimo aceptable; no obstante, se calculará el presupuesto para esta situación:

Tabla 30. Presupuesto estimado sin mantenimiento

Fuente: Elaboración propia

SIN MANTENIMIENTO	AÑO DE INVERSIÓN	
	20	
PRESUPUESTO DE OBRA	\$	42,285,830
SUB TOTAL GENERAL	\$	35,835,449
COSTO DIRECTO	\$	31,161,260
GASTOS GENERALES (10%)	\$	3,116,126
UTILIDAD (5%)	\$	1,558,063
IGV (18%)	\$	6,450,381
GASTOS INTANGIBLES	\$	4,228,583
ESTUDIO DEFINITIVO (5%)	\$	2,114,291
SUPERVISIÓN DE OBRA (5%)	\$	2,114,291
TOTAL INVERSIÓN	\$	46,514,413
VAN⁸(tasa de descuento 8%)	\$	9,979,584

Donde, el costo directo se calculó de la siguiente manera⁹:

Año	Intervención	Metrado	Unidad	Precio unitario (\$)	Precio unitario con inflación (\$)	Costo directo (\$)
20	Reconstrucción	112,500.00	m2	161.00	276.99	31,161,259.96

⁸ Reglamento del Decreto Legislativo N° 1252 que crea el Sistema Nacional de Programación Multianual y Gestión de Inversiones, aprobado con Decreto Supremo N° 027-2017-EF.

⁹ Precio unitario con inflación: $Precio\ unitario \times (100\% + 2.75\%)^{(\# años)}$

✓ **Alternativa 1: con mantenimiento correctivo:**

Tabla 31. Presupuesto estimado con mantenimiento correctivo

Fuente: Elaboración propia

ALTERNATIVA CON MANTENIMIENTO CORRECTIVO	AÑO DE INVERSIÓN	
	11	16
PRESUPUESTO DE OBRA	\$ 5,966,649	\$ 6,833,444
SUB TOTAL GENERAL	\$ 5,056,482	\$ 5,791,054
COSTO DIRECTO	\$ 4,396,941	\$ 5,035,700
GASTOS GENERALES (10%)	\$ 439,694	\$ 503,570
UTILIDAD(5%)	\$ 219,847	\$ 251,785
IGV(18%)	\$ 910,167	\$ 1,042,390
GASTOS INTANGIBLES	\$ 596,665	\$ 683,344
ESTUDIO DEFINITIVO (5%)	\$ 298,332	\$ 341,672
SUPERVISIÓN DE OBRA (5%)	\$ 298,332	\$ 341,672
TOTAL INVERSIÓN	\$ 6,563,314	\$ 7,516,789
VAN (tasa de descuento 8%)	\$ 5,008,972	

Donde, el costo directo se calculó de la siguiente manera:

Año	Intervención	Metrado	Unidad	Precio unitario (\$)	Precio unitario con inflación (\$)	Costo directo (\$)
11	Mantenimiento correctivo	112,500.00	m2	29.00	39.08	4,396,941.18
16	Mantenimiento correctivo	112,500.00	m2	29.00	44.76	5,035,699.53

✓ **Alternativa 2: con mantenimiento preventivo:**

Tabla 32. Presupuesto estimado con mantenimiento preventivo

Fuente: Elaboración propia

ALTERNATIVA CON MANTENIMIENTO PREVENTIVO	AÑO DE INVERSIÓN			
	10	13	16	19
PRESUPUESTO DE OBRA	\$ 2,728,330	\$ 2,959,664	\$ 3,210,612	\$ 3,482,839
SUB TOTAL GENERAL	\$ 2,312,144	\$ 2,508,190	\$ 2,720,858	\$ 2,951,558
COSTO DIRECTO	\$ 2,010,560	\$ 2,181,034	\$ 2,365,963	\$ 2,566,572
GASTOS GENERALES (10%)	\$ 201,056	\$ 218,103	\$ 236,596	\$ 256,657
UTILIDAD(5%)	\$ 100,528	\$ 109,052	\$ 118,298	\$ 128,329
IGV(18%)	\$ 416,186	\$ 451,474	\$ 489,754	\$ 531,280
GASTOS INTANGIBLES	\$ 272,833	\$ 295,966	\$ 321,061	\$ 348,284
ESTUDIO DEFINITIVO (5%)	\$ 136,416	\$ 147,983	\$ 160,531	\$ 174,142
SUPERVISIÓN DE OBRA (5%)	\$ 136,416	\$ 147,983	\$ 160,531	\$ 174,142
TOTAL INVERSIÓN	\$ 3,001,163	\$ 3,255,630	\$ 3,531,674	\$ 3,831,123
VAN (tasa de descuento 8%)	\$ 4,505,787			

Donde, el costo directo se calculó de la siguiente manera:

Año	Intervención	Metrado	Unidad	Precio unitario (\$)	Precio unitario con inflación (\$)	Costo directo (\$)
9	Mantenimiento preventivo	112,500.00	m2	14.00	17.87	2,010,559.98
12	Mantenimiento preventivo	112,500.00	m2	14.00	19.39	2,181,034.45
15	Mantenimiento preventivo	112,500.00	m2	14.00	21.03	2,365,963.37
18	Mantenimiento preventivo	112,500.00	m2	14.00	22.81	2,566,572.33

A continuación, se presenta diagramas de barra, donde se identifica la alternativa más rentable durante la vida útil del pavimento y el nivel de servicio al término de la misma.

Tabla 33. Análisis de alternativas

Fuente: Elaboración propia

INDICADOR	SIN MANTENIMIENTO	ALTERNATIVA 1: CON MANTENIMIENTO CORRECTIVO	ALTERNATIVA 2: CON MANTENIMIENTO PREVENTIVO
VAN	\$ 9,979,584	\$ 5,008,972	\$ 4,505,787
PCI al finalizar vida útil	20	71	80

VAN Vs Situación con/sin M&R

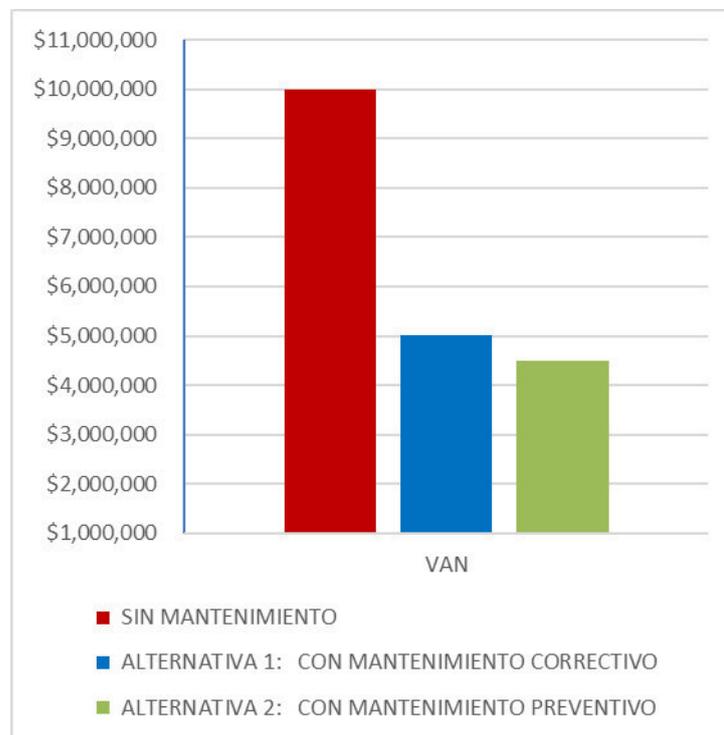


Figura 34. Análisis de alternativas - Costo

Fuente: Elaboración propia

Nivel de servicio (PCI) Vs Situación con/sin M&R

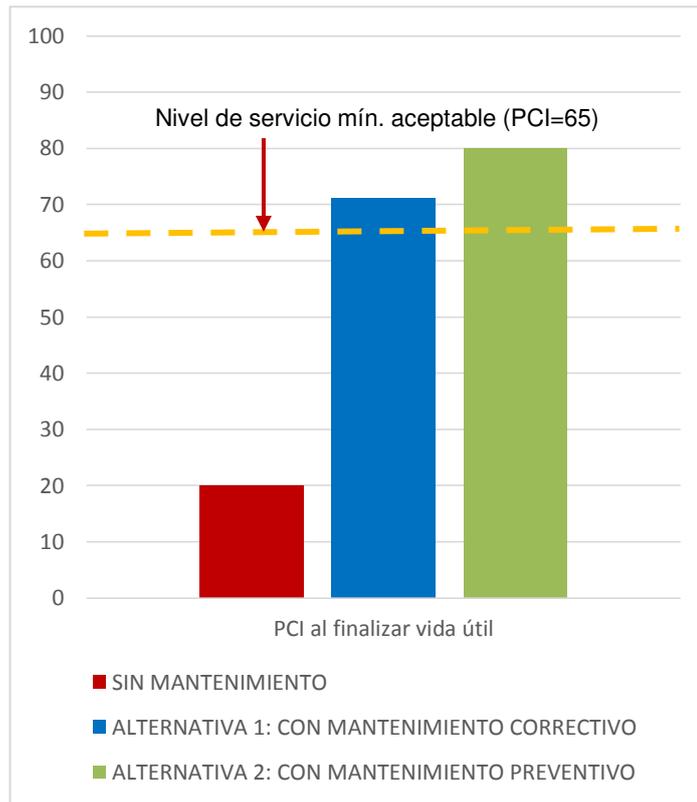


Figura 35. Análisis de alternativas – Nivel de servicio
Fuente: Elaboración propia

RESULTADOS:

- Sin mantenimiento : ----

No se considera como alternativa. Se pone en riesgo la seguridad operacional de las aeronaves en los años donde el PCI es inferior al mínimo aceptable

- Con mantenimiento correctivo : -----

Realiza intervenciones cuando el PCI cae debajo del mínimo aceptable, no es la alternativa más rentable

- **Con mantenimiento preventivo : Alternativa seleccionada**

Garantiza la seguridad operacional de las aeronaves y optimiza recursos durante la vida útil del pavimento.

5.6. PLAN DE M&R

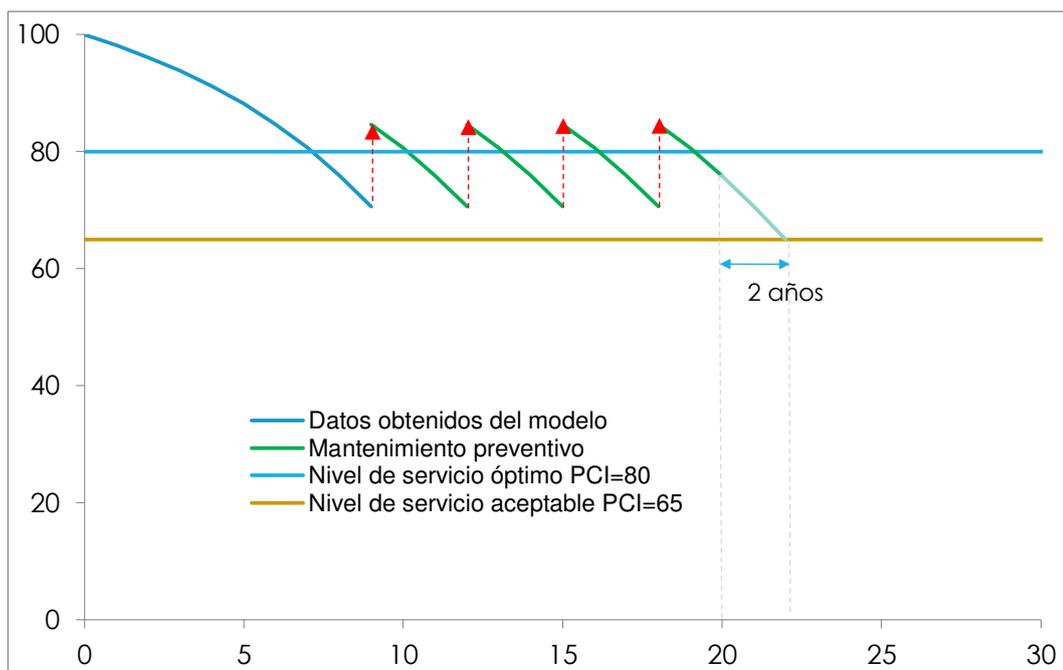
A continuación, se presenta el plan de M&R:

Es importante mencionar que, no se presenta el análisis financiero; dado que, determinar los ingresos y egresos del aeropuerto no es parte de la presente investigación, por lo tanto la presente investigación tiene limitaciones financieras.

Del análisis de alternativas presentado, se concluyó que realizando intervenciones de mantenimiento preventivo cada 03 años, se garantiza mantener el pavimento en un nivel de servicio satisfactorio, optimizando recursos.

Las intervenciones deben ser realizadas en los años 9, 12, 15 y 18; obteniendo una condición por encima a la mínima aceptable durante su ciclo de vida útil (PCI mayor o igual a 65). Siendo su representación gráfica la siguiente:

PCI Vs Edad del pavimento



El mantenimiento preventivo para el caso en estudio, contempla las siguientes intervenciones:

MANTENIMIENTO PREVENTIVO PERIÓDICO	UNIDAD	COSTO DIRECTO
REPOSICIÓN DE PINTURA O SEÑALIZACIÓN	M2	\$ 13.85
SLURRY ASFÁLTICO SUPERFICIAL	M2	\$ 10.78
SELLADO DE FISURAS Y GRIETAS	M	\$ 9.50

Programación de inversiones:

MANTENIMIENTO PREVENTIVO	AÑO DE INVERSIÓN			
	10	13	16	19
PRESUPUESTO DE OBRA	\$ 2,728,330	\$ 2,959,664	\$ 3,210,612	\$ 3,482,839
SUB TOTAL GENERAL	\$ 2,312,144	\$ 2,508,190	\$ 2,720,858	\$ 2,951,558
COSTO DIRECTO	\$ 2,010,560	\$ 2,181,034	\$ 2,365,963	\$ 2,566,572
GASTOS GENERALES (10%)	\$ 201,056	\$ 218,103	\$ 236,596	\$ 256,657
UTILIDAD(5%)	\$ 100,528	\$ 109,052	\$ 118,298	\$ 128,329
IGV(18%)	\$ 416,186	\$ 451,474	\$ 489,754	\$ 531,280
GASTOS INTANGIBLES	\$ 272,833	\$ 295,966	\$ 321,061	\$ 348,284
ESTUDIO DEFINITIVO (5%)	\$ 136,416	\$ 147,983	\$ 160,531	\$ 174,142
SUPERVISIÓN DE OBRA (5%)	\$ 136,416	\$ 147,983	\$ 160,531	\$ 174,142
TOTAL INVERSIÓN	\$ 3,001,163	\$ 3,255,630	\$ 3,531,674	\$ 3,831,123
VAN (tasa de descuento 8%)	\$ 4,505,787			

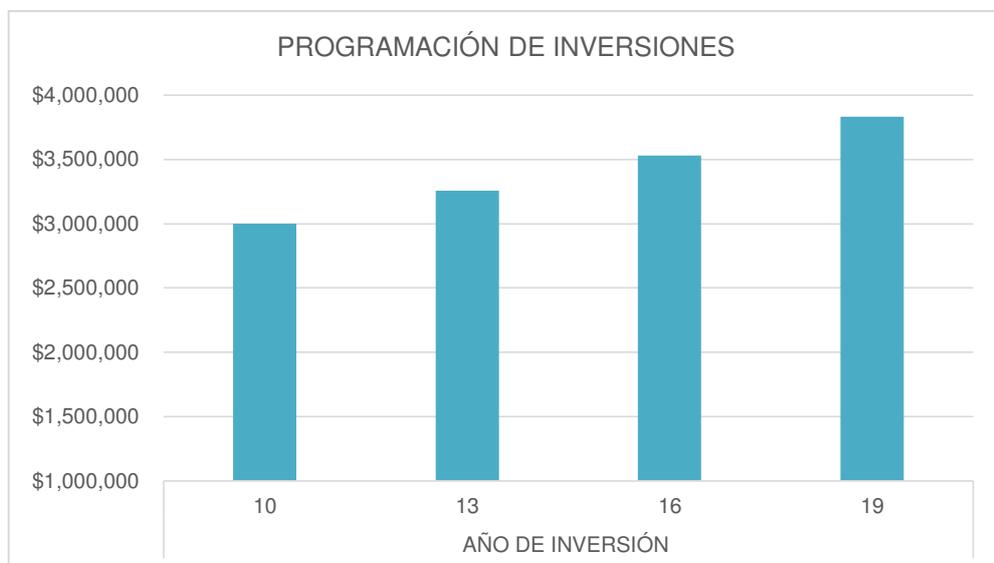


Figura 36. Programación de inversiones – Plan de M&R

Fuente: Elaboración propia

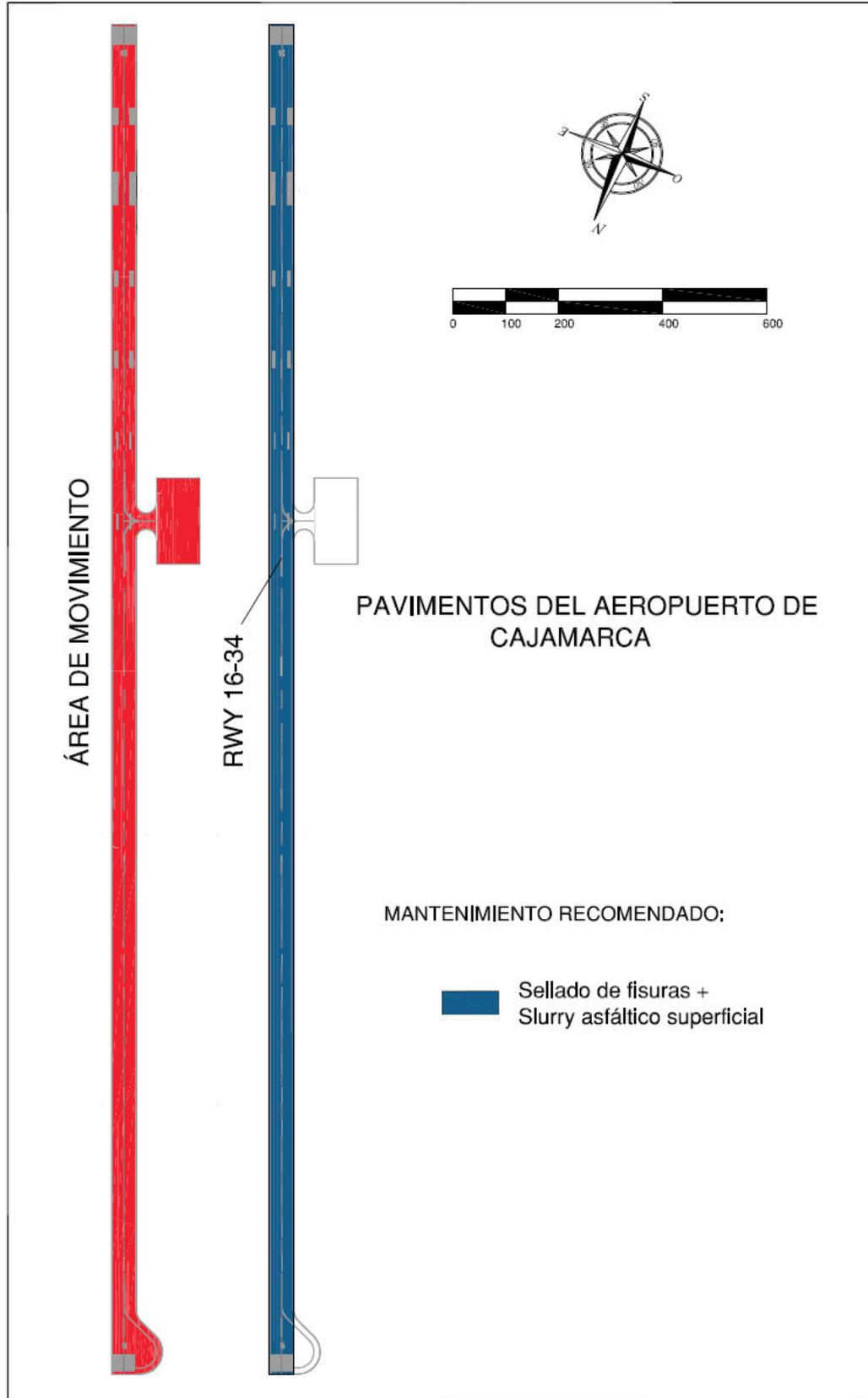


Figura 37. SGPA- Mantenimiento recomendado

Fuente: Elaboración propia

CONCLUSIONES

1. Al realizar la inspección superficial del pavimento de manera periódica, el indicador numérico PCI y la edad del pavimento (tiempo), variables cuantitativas continuas, pueden ser correlacionadas con fines de obtener un modelo que describa y pronostique el comportamiento de un pavimento en el tiempo.
2. En lugar de asumir valores del comportamiento del pavimento (juicio de expertos) para determinar la MPT, se concluye que es posible obtener datos para calibrar la citada matriz a partir del proceso numérico de regresión no lineal logística de los datos históricos recopilados.

Esto es validado, cuando al calcular valores obtenidos con el modelo markoviano (pronóstico) y los datos históricos la pista de aterrizaje del aeropuerto de Cajamarca, se tienen valores coherentes de deterioro. $PCI(\bar{E}(4)) = PCI(2007) = 91$ y $PCI(\bar{E}(10)) = PCI(2013) = 65$.
3. Si se realizan modelos de deterioro, para diversas circunstancias (clima, tráfico, material, entre otros), en los que los pavimentos aeroportuarios del Perú son puestos en servicio; el pronóstico de la condición del pavimento dependerá de cómo se comporta el pavimento actualmente (conocer el estado actual).
4. Un SGPA requiere un preciso y eficiente modelo de predicción, dado que, la programación de intervenciones a realizar en el pavimento y los presupuestos requeridos, se basan en los pronósticos de estado del modelo, por lo que emplear el modelo de Markov resulta adecuado.
5. Los costos asociados a estrategias de M&R varían considerablemente para cuando se realiza la intervención en una condición del pavimento satisfactoria, comparada con una condición seria o de falla, que pone en riesgo la seguridad operacional. Esta diferencia se logra observar tanto en la Figura 29 (14 \$/m² vs 110 \$/m²) y, la Tabla 33 (4.51 MM\$ vs 9.98 MM\$). En tal sentido, se concluye que el desarrollo de un programa de mantenimiento preventivo garantiza la seguridad operacional de las aeronaves optimizando recursos.

6. Realizar intervenciones de mantenimiento en base a las necesidades inmediatas (mantenimiento correctivo) y sin una correcta planificación, como en el caso de la pista de aterrizaje del aeropuerto de Cajamarca (y en general los aeropuertos del Perú), resulta en una gestión ineficiente de los recursos; dado que, no toma en cuenta la relación costo-beneficio durante el ciclo de vida útil del pavimento. Esta comparación se puede realizar con el Valor Actual calculado en la Tabla 33 para mantenimiento correctivo y para mantenimiento preventivo (5.00 MM\$ vs 4.51 MM\$).

RECOMENDACIONES

1. Se recomienda realizar la inspección superficial del pavimento de manera periódica, frecuencia anual, considerando unidades de muestra con la misma ubicación, dimensión y nombre; a fin de que permita al encargado de la inspección ubicarlas fácilmente para verificar la información del deterioro presente, identificar cambios con el tiempo, y permitir futuras inspecciones de la misma muestra de ser necesarias.
2. Generar retroalimentación del SGPA con las inspecciones periódicas, comparar los datos esperados de condición del pavimento con los datos observados en campo, y continuar con el modelo verificado o realizar las actualizaciones requeridas, de ser el caso.
3. Existen Softwares como el PAVER (EEUU) o AIRPORTS (DINAMARCA), herramientas para desarrollar SGPA, se recomienda verificar si las curvas de deterioro que comprenden, son aplicables para condiciones de tránsito, clima, material y técnicas constructivas de pavimentos en Perú; y realizar la calibración respectiva, de ser necesario.
4. Proponer una nueva investigación con data estructural y funcional para hacer más robusto el modelo de predicción propuesto.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. American Society for Testing and Materials, "Standard Test Method for Airport Pavement Condition Index Surveys", ASTM D5340-12, Pensilvania, 2013.
2. Butt Abbas, Shahin Mohamed, Feighan Kieran y Carpenter Samuel, "Pavement Performance Prediction Model Using the Markov Process", Transportation Research Record 1123, Illinois, 1987.
3. Butt Abbas, Shahin Mohamed, Carpenter Samuel y Carnahan James, "Application of Markov Process to Pavement Management Systems at Network Level", 3rd International Conference on Managing Pavements, Illinois, 1994.
4. Central Intelligence Agency, "The world factbook", Transportation Perú, Estados Unidos, 2013.
5. Corporación Peruana de Aeropuertos y Aviación Comercial, "Publicación de Información Aeronáutica (AIP) del Perú", Cuarta edición, Lima, 2015.
6. Devore Jay, "Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias", Sexta edición, Thomson Editores, México, 2005.
7. Dirección General de Aeronáutica Civil (DGAC), Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC), Solicitud de acceso a la información pública T-269907-2017, Lima, Perú, 2017.
8. DGAC, MTC, portal web publicado en: https://www.mtc.gob.pe/transportes/aeronautica_civil/, Perú.
9. Federal Aviation Administration - U.S. Department of Transportation, "Airport Pavement Design and Evaluation", Advisory Circular No 150/5320-6E, Washington D.C., 2009.
10. Federal Aviation Administration - U.S. Department of Transportation, "Airport Pavement Management Program (PMP)", Advisory Circular No 150/5380-7B, Washington D.C., 2014 a.

11. Federal Aviation Administration - U.S. Department of Transportation, "Guidelines and Procedures for Maintenance of Airport Pavements", Advisory Circular No 150/5380-6C, Washington D.C., 2014 b.
12. Freeman Thomas, Borowiec Jeffrey, Wilson Bryan, Arabali Poura y Sakhaeifar Maryam, "Pavement Maintenance Guidelines for General Aviation Airport Management", Airport Cooperative Research Program - Report 159, Washington D.C., 2016.
13. George K.P., Rajagopal A.S. y Lim L.K., "Models fro Predicting Pavement Deterioration", Transportation Research Record 1215, Misisipi, 1989.
14. Hajek Jerry, Hall Jim y Hein David, "Common Airport Pavement Maintenance Practices", Airport Cooperative Research Program - Synthesis 22, Washington D.C., 2011.
15. Hernández Sampieri Roberto, Fernández Collado Carlos y Baptista Lucio María, "Metodología de la investigación", Edición N° 05, Editorial McGraw-Hill, México D.F., 2010.
16. Nuñez María y Shahin Mohamed, "Pavement Condition Data Analysis and Modeling", Transportation Research Record 1070, Illinois, 1986.
17. Organización de Aviación Civil Internacional, "Normas y métodos recomendados internacionales – Aeródromos – Anexo 14 - Volumen I: Diseño y operaciones de aeródromos", Montréal, Quebec, 2013.
18. Organización De Aviación Civil Internacional, "Doc. 9157-AN/901 Manual de proyecto de aeródromos – Segunda Edición - Parte 3: Pavimentos", Montréal, Quebec, 1983.
19. Pellinen Terhi, Witczak Matthew, y Bonaquist Ramon, "Asphalt Mix Master Curve Construction using Sigmoidal Fitting Function with Non-Linear Least Squares Optimization Technique", Materials characterization/modeling of pavement systems ASCE, New York, 2003.
20. Shapiro Wilk, "An analysis of variance test for normality (complete samples)", BiométriKa 52, Herramienta publicada en <http://sdittami.altervista.org/shapirotest/ShapiroTest.html>.

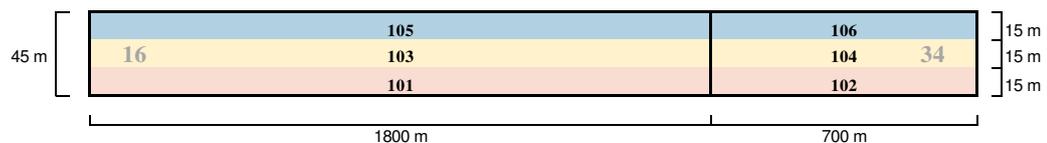
21. Solorio José, Márquez Zaydith, Montoya Monserrat, Cárdenas Santa y Hernández Domínguez, "Aplicación de métodos markovianos en el modelado del deterioro de carreteras", Instituto Mexicano del Transporte, Publicación Técnica N°396, México, 2014.
22. Tighe Susan y Covalt Margaret, "Implementation of an airport Pavement Management System", Transportation Research Circular, E-C127, Washington D.C., 2008.
23. Yusoff Nur, Chailleux Emmanuel y Airey Gordon, "A Comparative Study of the Influence of Shift Factor Equations on Master Curve Construction", International Journal of Pavement Research and Technology, Vol. 4 N°6, Nottingham, 2011.
24. Zimmerman Kathryn, "Pavement Management Methodologies to select Projects and Recommend Preservation Treatments", Synthesis of Highway Practice 222, Washington D.C., 1995.

ANEXOS

Anexo 1. Reporte de inspecciones PCI (2007, 2013, 2014 Y 2015)

La numeración de las progresivas en cada año de inspección fueron iniciadas de diferentes umbrales, la información presentada a continuación ha sido ordenada en el sentido 16-34 de la pista de aterrizaje para fines prácticos y hacer coincidir con la sectorización realizada en el ítem 3.3.

A continuación se muestra una ilustración de la sectorización de la pista,



Las unidades de muestra tomadas en las inspecciones tienen un área de 450 m² (15 m x 45 m).

Tabla 34. Anexo 1 – PCI 2007 Pista de aterrizaje, Aeropuerto de Cajamarca
Fuente: DGAC

2007										
PROGRESIVA		UNIDAD		PCI	UNIDAD		PCI	UNIDAD		PCI
00+000	00+030	SLD	174	91	SC	083		SLI	175	
00+030	00+060	SLD	173		SC	082	90	SLI	172	
00+060	00+090	SLD	170		SC	081		SLI	171	
00+090	00+120	SLD	169	91	SC	080		SLI	168	91
00+120	00+150	SLD	166		SC	079	90	SLI	167	
00+150	00+180	SLD	165		SC	078		SLI	164	
00+180	00+210	SLD	162	91	SC	077		SLI	163	91
00+210	00+240	SLD	161		SC	076	90	SLI	160	
00+240	00+270	SLD	158		SC	075		SLI	159	
00+270	00+300	SLD	157	91	SC	074		SLI	156	91
00+300	00+330	SLD	154		SC	073	90	SLI	155	
00+330	00+360	SLD	153		SC	072		SLI	152	
00+360	00+390	SLD	150	91	SC	071		SLI	151	91
00+390	00+420	SLD	149		SC	070	90	SLI	148	
00+420	00+450	SLD	146		SC	069		SLI	147	
00+450	00+480	SLD	145	91	SC	068		SLI	144	91
00+480	00+510	SLD	142		SC	067	90	SLI	143	
00+510	00+540	SLD	141		SC	066		SLI	140	
00+540	00+570	SLD	138	91	SC	065		SLI	139	91

2007										
PROGRESIVA		UNIDAD		PCI	UNIDAD		PCI	UNIDAD		PCI
00+570	00+600	SLD	137		SC	064	90	SLI	136	
00+600	00+630	SLD	134		SC	063		SLI	135	
00+630	00+660	SLD	133	91	SC	062		SLI	132	91
00+660	00+690	SLD	130		SC	061	87	SLI	131	
00+690	00+720	SLD	129		SC	060		SLI	128	
00+720	00+750	SLD	126	91	SC	059		SLI	127	91
00+750	00+780	SLD	125		SC	058	87	SLI	124	
00+780	00+810	SLD	122		SC	057		SLI	012	
00+810	00+840	SLD	121	91	SC	056		SLI	120	91
00+840	00+870	SLD	118		SC	055	87	SLI	119	
00+870	00+900	SLD	117		SC	054		SLI	116	
00+900	00+930	SLD	114	91	SC	053		SLI	115	91
00+930	00+960	SLD	113		SC	052	90	SLI	112	
00+960	00+990	SLD	110		SC	051		SLI	111	
00+990	01+020	SLD	109	91	SC	050		SLI	108	91
01+020	01+050	SLD	106		SC	049	90	SLI	107	
01+050	01+080	SLD	105		SC	048		SLI	104	
01+080	01+110	SLD	102	91	SC	047		SLI	103	91
01+110	01+140	SLD	101		SC	046	87	SLI	100	
01+140	01+170	SLD	098		SC	045		SLI	099	
01+170	01+200	SLD	097	91	SC	044		SLI	096	91
01+200	01+230	SLD	094		SC	043	90	SLI	095	
01+230	01+260	SLD	093		SC	042		SLI	092	
01+260	01+290	SLD	090	91	SC	041		SLI	091	91
01+290	01+320	SLD	089		SC	040	90	SLI	088	
01+320	01+350	SLD	086		SC	039		SLI	087	
01+350	01+380	SLD	085	91	SC	038		SLI	084	91
01+380	01+410	SLD	082		SC	037	85	SLI	083	
01+410	01+440	SLD	081		SC	036		SLI	080	
01+440	01+470	SLD	078	91	SC	035		SLI	079	91
01+470	01+500	SLD	077		SC	034	90	SLI	076	
01+500	01+530	SLD	074		SC	033		SLI	075	
01+530	01+560	SLD	073	91	SC	032		SLI	072	91
01+560	01+590	SLD	070		SC	031	90	SLI	071	
01+590	01+620	SLD	069		SC	030		SLI	068	
01+620	01+650	SLD	066	91	SC	029		SLI	067	91
01+650	01+680	SLD	065		SC	028	87.3	SLI	064	
01+680	01+710	SLD	062		SC	027		SLI	063	
01+710	01+740	SLD	061	91	SC	026		SLI	060	91
01+740	01+770	SLD	058		SC	025	90	SLI	059	
01+770	01+800	SLD	057		SC	024		SLI	056	
01+800	01+830	SLD	054	91	SC	023		SLI	055	91
01+830	01+860	SLD	053		SC	022	90	SLI	052	

2007										
PROGRESIVA		UNIDAD		PCI	UNIDAD		PCI	UNIDAD		PCI
01+860	01+890	SLD	050		SC	021		SLI	051	
01+890	01+920	SLD	049	91	SC	020		SLI	048	91
01+920	01+950	SLD	046		SC	019		SLI	047	
01+950	01+980	SLD	045		SC	018		SLI	044	
01+980	02+010	SLD	042	91	SC	017		SLI	043	91
02+010	02+040	SLD	041		SC	016	90	SLI	040	
02+040	02+070	SLD	038		SC	015		SLI	039	
02+070	02+100	SLD	037	91	SC	014		SLI	036	91
02+100	02+130	SLD	034		SC	013	90	SLI	035	
02+130	02+160	SLD	033		SC	012		SLI	032	
02+160	02+190	SLD	030	91	SC	011		SLI	031	91
02+190	02+220	SLD	029		SC	010	90	SLI	028	
02+220	02+250	SLD	026		SC	009		SLI	027	
02+250	02+280	SLD	025	91	SC	008		SLI	024	91
02+280	02+310	SLD	022		SC	007	90	SLI	023	
02+310	02+340	SLD	021		SC	006		SLI	020	
02+340	02+370	SLD	018	91	SC	005		SLI	019	91
02+370	02+400	SLD	016		SC	004	90	SLI	015	
02+400	02+430	SLD	013		SC	003		SLI	014	
02+430	02+460	SLD	007	91	SC	002		SLI	006	91
02+460	02+490	SLD	004		SC	001	90	SLI	005	
02+490	02+520									

Tabla 35. Anexo 1 – PCI 2013 Pista de aterrizaje, Aeropuerto de Cajamarca
Fuente: DGAC

2013										
PROGRESIVA		UNIDAD		PCI	UNIDAD		PCI	UNIDAD		PCI
02+490	02+520	84	A	65	84	B	59	84	C	64
02+460	02+490	83	A	70	83	B	68	83	C	66
02+430	02+460	82	A	69	82	B	58	82	C	63
02+400	02+430	81	A	69	81	B	58	81	C	63
02+370	02+400	80	A	70	80	B	58	80	C	63
02+340	02+370	79	A	70	79	B	58	79	C	63
02+310	02+340	78	A	70	78	B	58	78	C	63
02+280	02+310	77	A	69	77	B	66	77	C	66
02+250	02+280	76	A	69	76	B	58	76	C	63
02+220	02+250	75	A	69	75	B	66	75	C	66
02+190	02+220	74	A	69	74	B	58	74	C	63
02+160	02+190	73	A	68	73	B	66	73	C	66
02+130	02+160	72	A	69	72	B	67	72	C	66
02+100	02+130	71	A	69	71	B	69	71	C	69
02+070	02+100	70	A	69	70	B	58	70	C	63
02+040	02+070	69	A	69	69	B	68	69	C	63
02+010	02+040	68	A	70	68	B	66	68	C	63
01+980	02+010	67	A	70	67	B	58	67	C	63
01+950	01+980	66	A	70	66	B	58	66	C	58
01+920	01+950	65	A	70	65	B	66	65	C	66
01+890	01+920	64	A	70	64	B	58	64	C	58
01+860	01+890	63	A	70	63	B	62	63	C	58
01+830	01+860	62	A	70	62	B	69	62	C	58
01+800	01+830	61	A	69	61	B	66	61	C	63
01+770	01+800	60	A	69	60	B	69	60	C	66
01+740	01+770	59	A	69	59	B	64	59	C	69
01+710	01+740	58	A	70	58	B	65	58	C	70
01+680	01+710	57	A	70	57	B	66	57	C	67
01+650	01+680	56	A	70	56	B	66	56	C	67
01+620	01+650	55	A	69	55	B	58	55	C	58
01+590	01+620	54	A	70	54	B	69	54	C	69
01+560	01+590	53	A	69	53	B	66	53	C	66
01+530	01+560	52	A	69	52	B	58	52	C	66
01+500	01+530	51	A	69	51	B	69	51	C	58
01+470	01+500	50	A	69	50	B	58	50	C	58
01+440	01+470	49	A	69	49	B	70	49	C	58
01+410	01+440	48	A	65	48	B	70	48	C	64
01+380	01+410	47	A	65	47	B	70	47	C	66
01+350	01+380	46	A	64	46	B	58	46	C	58
01+320	01+350	45	A	67	45	B	58	45	C	69
01+290	01+320	44	A	67	44	B	58	44	C	66

2013										
PROGRESIVA		UNIDAD		PCI	UNIDAD		PCI	UNIDAD		PCI
01+260	01+290	43	A	66	43	B	58	43	C	58
01+230	01+260	42	A	70	42	B	58	42	C	63
01+200	01+230	41	A	70	41	B	58	41	C	63
01+170	01+200	40	A	69	40	B	58	40	C	70
01+140	01+170	39	A	68	39	B	58	39	C	66
01+110	01+140	38	A	70	38	B	70	38	C	58
01+080	01+110	37	A	70	37	B	68	37	C	58
01+050	01+080	36	A	68	36	B	64	36	C	67
01+020	01+050	35	A	70	35	B	69	35	C	58
00+990	01+020	34	A	70	34	B	70	34	C	63
00+960	00+990	33	A	70	33	B	70	33	C	66
00+930	00+960	32	A	70	32	B	70	32	C	63
00+900	00+930	31	A	69	31	B	70	31	C	63
00+870	00+900	30	A	69	30	B	70	30	C	63
00+840	00+870	29	A	63	29	B	70	29	C	58
00+810	00+840	28	A	63	28	B	70	28	C	58
00+780	00+810	27	A	69	27	B	69	27	C	69
00+750	00+780	26	A	66	26	B	64	26	C	64
00+720	00+750	25	A	70	25	B	70	25	C	58
00+690	00+720	24	A	69	24	B	66	24	C	66
00+660	00+690	23	A	69	23	B	58	23	C	63
00+630	00+660	22	A	70	22	B	58	22	C	69
00+600	00+630	21	A	70	21	B	66	21	C	65
00+570	00+600	20	A	68	20	B	58	20	C	58
00+540	00+570	19	A	66	19	B	69	19	C	64
00+510	00+540	18	A	69	18	B	58	18	C	58
00+480	00+510	17	A	63	17	B	58	17	C	63
00+450	00+480	16	A	58	16	B	58	16	C	58
00+420	00+450	15	A	69	15	B	58	15	C	67
00+390	00+420	14	A	69	14	B	58	14	C	69
00+360	00+390	13	A	68	13	B	66	13	C	66
00+330	00+360	12	A	69	12	B	58	12	C	63
00+300	00+330	11	A	69	11	B	68	11	C	65
00+270	00+300	10	A	66	10	B	68	10	C	63
00+240	00+270	9	A	58	9	B	58	9	C	63
00+210	00+240	8	A	59	8	B	59	8	C	58
00+180	00+210	7	A	59	7	B	59	7	C	59
00+150	00+180	6	A	58	6	B	68	6	C	69
00+120	00+150	5	A	69	5	B	67	5	C	63
00+090	00+120	4	A	69	4	B	58	4	C	63
00+060	00+090	3	A	69	3	B	58	3	C	63
00+030	00+060	2	A	69	2	B	58	2	C	58
00+000	00+030	1	A	67	1	B	59	1	C	63

Tabla 36. Anexo 1 – PCI 2014 Pista de aterrizaje, Aeropuerto de Cajamarca
Fuente: DGAC

2014												
PROGRESIVA		UNIDAD			PCI	UNIDAD			PCI	UNIDAD		PCI
00+000	00+030	1	PII	82	1	PIC	93	1	PID	86		
00+030	00+060	2	PII	84	2	PIC	96	2	PID	79		
00+060	00+090	3	PII	76	3	PIC	93	3	PID	84		
00+090	00+120	4	PII	75	4	PIC	89	4	PID	84		
00+120	00+150	5	PII	83	5	PIC	94	5	PID	84		
00+150	00+180	6	PII	80	6	PIC	87	6	PID	83		
00+180	00+210	7	PII	79	7	PIC	90	7	PID	84		
00+210	00+240	8	PII	79	8	PIC	90	8	PID	78		
00+240	00+270	9	PII	85	9	PIC	97	9	PID	79		
00+270	00+300	10	PII	85	10	PIC	93	10	PID	86		
00+300	00+330	11	PII	86	11	PIC	90	11	PID	86		
00+330	00+360	12	PII	78	12	PIC	86	12	PID	86		
00+360	00+390	13	PII	80	13	PIC	91	13	PID	87		
00+390	00+420	14	PII	84	14	PIC	89	14	PID	83		
00+420	00+450	15	PII	77	15	PIC	86	15	PID	86		
00+450	00+480	16	PII	82	16	PIC	97	16	PID	86		
00+480	00+510	17	PII	82	17	PIC	84	17	PID	85		
00+510	00+540	18	PII	86	18	PIC	90	18	PID	82		
00+540	00+570	19	PII	87	19	PIC	83	19	PID	84		
00+570	00+600	20	PII	84	20	PIC	86	20	PID	81		
00+600	00+630	21	PII	87	21	PIC	85	21	PID	84		
00+630	00+660	22	PII	87	22	PIC	90	22	PID	78		
00+660	00+690	23	PII	85	23	PIC	94	23	PID	79		
00+690	00+720	24	PII	84	24	PIC	85	24	PID	85		
00+720	00+750	25	PII	88	25	PIC	91	25	PID	90		
00+750	00+780	26	PII	85	26	PIC	95	26	PID	89		
00+780	00+810	27	PII	81	27	PIC	86	27	PID	89		
00+810	00+840	28	PII	86	28	PIC	88	28	PID	87		
00+840	00+870	29	PII	84	29	PIC	91	29	PID	85		
00+870	00+900	30	PII	86	30	PIC	88	30	PID	86		
00+900	00+930	31	PII	82	31	PIC	85	31	PID	88		
00+930	00+960	32	PII	80	32	PIC	85	32	PID	87		
00+960	00+990	33	PII	86	33	PIC	83	33	PID	87		
00+990	01+020	34	PII	82	34	PIC	91	34	PID	86		
01+020	01+050	35	PII	82	35	PIC	94	35	PID	88		
01+050	01+080	36	PII	85	36	PIC	89	36	PID	87		
01+080	01+110	37	PII	87	37	PIC	96	37	PID	85		
01+110	01+140	38	PII	86	38	PIC	94	38	PID	88		
01+140	01+170	39	PII	86	39	PIC	94	39	PID	90		
01+170	01+200	40	PII	87	40	PIC	88	40	PID	90		
01+200	01+230	41	PII	84	41	PIC	88	41	PID	86		

2014										
PROGRESIVA		UNIDAD			UNIDAD			UNIDAD		PCI
01+230	01+260	42	PII	85	42	PIC	93	42	PID	88
01+260	01+290	43	PII	83	43	PIC	84	43	PID	88
01+290	01+320	44	PII	78	44	PIC	84	44	PID	85
01+320	01+350	45	PII	86	45	PIC	86	45	PID	79
01+350	01+380	46	PII	79	46	PIC	94	46	PID	84
01+380	01+410	47	PII	86	47	PIC	81	47	PID	87
01+410	01+440	48	PII	82	48	PIC	85	48	PID	87
01+440	01+470	49	PII	86	49	PIC	81	49	PID	82
01+470	01+500	50	PII	85	50	PIC	79	50	PID	86
01+500	01+530	51	PII	83	51	PIC	86	51	PID	81
01+530	01+560	52	PII	76	52	PIC	86	52	PID	81
01+560	01+590	53	PII	81	53	PIC	81	53	PID	83
01+590	01+620	54	PII	77	54	PIC	75	54	PID	85
01+620	01+650	55	PII	85	55	PIC	79	55	PID	83
01+650	01+680	56	PII	82	56	PIC	86	56	PID	84
01+680	01+710	57	PII	85	57	PIC	83	57	PID	81
01+710	01+740	58	PII	80	58	PIC	81	58	PID	84
01+740	01+770	59	PII	78	59	PIC	84	59	PID	86
01+770	01+800	60	PII	81	60	PIC	88	60	PID	84
01+800	01+830	61	PII	80	61	PIC	78	61	PID	84
01+830	01+860	62	PII	84	62	PIC	83	62	PID	88
01+860	01+890	63	PII	84	63	PIC	79	63	PID	87
01+890	01+920	64	PII	79	64	PIC	78	64	PID	74
01+920	01+950	65	PII	82	65	PIC	83	65	PID	82
01+950	01+980	66	PII	80	66	PIC	83	66	PID	81
01+980	02+010	67	PII	79	67	PIC	83	67	PID	84
02+010	02+040	68	PII	78	68	PIC	85	68	PID	80
02+040	02+070	69	PII	84	69	PIC	79	69	PID	74
02+070	02+100	70	PII	76	70	PIC	87	70	PID	88
02+100	02+130	71	PII	82	71	PIC	82	71	PID	85
02+130	02+160	72	PII	76	72	PIC	87	72	PID	85
02+160	02+190	73	PII	83	73	PIC	82	73	PID	87
02+190	02+220	74	PII	75	74	PIC	84	74	PID	87
02+220	02+250	75	PII	84	75	PIC	78	75	PID	84
02+250	02+280	76	PII	77	76	PIC	80	76	PID	87
02+280	02+310	77	PII	81	77	PIC	79	77	PID	79
02+310	02+340	78	PII	86	78	PIC	98	78	PID	89
02+340	02+370	79	PII	85	79	PIC	87	79	PID	87
02+370	02+400	80	PII	86	80	PIC	89	80	PID	85
02+400	02+430	81	PII	85	81	PIC	80	81	PID	87
02+430	02+460	82	PII	84	82	PIC	87	82	PID	80
02+460	02+490	83	PII	83	83	PIC	88	83	PID	76
02+490	02+520									

Tabla 37. Anexo 1 – PCI 2015 Pista de aterrizaje, Aeropuerto de Cajamarca
Fuente: DGAC

2015										
PROGRESIVA		UNIDAD		PCI	UNIDAD		PCI	UNIDAD		PCI
02+460	02+490	83	A	84	83	B	83	83	C	86
02+430	02+460	82	A	83	82	B	83	82	C	83
02+400	02+430	81	A	84	81	B	83	81	C	83
02+370	02+400	80	A	83	80	B	83	80	C	83
02+340	02+370	79	A	83	79	B	83	79	C	83
02+310	02+340	78	A	83	78	B	83	78	C	83
02+280	02+310	77	A	83	77	B	83	77	C	83
02+250	02+280	76	A	83	76	B	83	76	C	84
02+220	02+250	75	A	83	75	B	84	75	C	83
02+190	02+220	74	A	83	74	B	85	74	C	83
02+160	02+190	73	A	83	73	B	85	73	C	83
02+130	02+160	72	A	83	72	B	84	72	C	84
02+100	02+130	71	A	83	71	B	81	71	C	83
02+070	02+100	70	A	83	70	B	81	70	C	79
02+040	02+070	69	A	84	69	B	83	69	C	79
02+010	02+040	68	A	83	68	B	83	68	C	80
01+980	02+010	67	A	83	67	B	83	67	C	83
01+950	01+980	66	A	83	66	B	83	66	C	80
01+920	01+950	65	A	83	65	B	83	65	C	83
01+890	01+920	64	A	83	64	B	83	64	C	83
01+860	01+890	63	A	83	63	B	84	63	C	83
01+830	01+860	62	A	83	62	B	84	62	C	80
01+800	01+830	61	A	83	61	B	85	61	C	84
01+770	01+800	60	A	83	60	B	79	60	C	79
01+740	01+770	59	A	83	59	B	83	59	C	83
01+710	01+740	58	A	84	58	B	84	58	C	83
01+680	01+710	57	A	80	57	B	88	57	C	83
01+650	01+680	56	A	83	56	B	82	56	C	83
01+620	01+650	55	A	83	55	B	84	55	C	83
01+590	01+620	54	A	83	54	B	84	54	C	83
01+560	01+590	53	A	83	53	B	84	53	C	80
01+530	01+560	52	A	83	52	B	83	52	C	83
01+500	01+530	51	A	83	51	B	85	51	C	83
01+470	01+500	50	A	83	50	B	84	50	C	83
01+440	01+470	49	A	83	49	B	82	49	C	83
01+410	01+440	48	A	83	48	B	84	48	C	83
01+380	01+410	47	A	83	47	B	85	47	C	83
01+350	01+380	46	A	83	46	B	82	46	C	83
01+320	01+350	45	A	80	45	B	86	45	C	83
01+290	01+320	44	A	83	44	B	84	44	C	83
01+260	01+290	43	A	83	43	B	83	43	C	83

2015										
PROGRESIVA		UNIDAD		PCI	UNIDAD		PCI	UNIDAD		PCI
01+230	01+260	42	A	83	42	B	82	42	C	84
01+200	01+230	41	A	83	41	B	82	41	C	83
01+170	01+200	40	A	83	40	B	83	40	C	83
01+140	01+170	39	A	83	39	B	83	39	C	83
01+110	01+140	38	A	83	38	B	85	38	C	83
01+080	01+110	37	A	76	37	B	83	37	C	83
01+050	01+080	36	A	83	36	B	80	36	C	83
01+020	01+050	35	A	83	35	B	86	35	C	83
00+990	01+020	34	A	83	34	B	84	34	C	83
00+960	00+990	33	A	83	33	B	79	33	C	83
00+930	00+960	32	A	84	32	B	82	32	C	83
00+900	00+930	31	A	85	31	B	84	31	C	83
00+870	00+900	30	A	83	30	B	93	30	C	83
00+840	00+870	29	A	83	29	B	93	29	C	83
00+810	00+840	28	A	80	28	B	93	28	C	83
00+780	00+810	27	A	83	27	B	93	27	C	83
00+750	00+780	26	A	83	26	B	93	26	C	83
00+720	00+750	25	A	85	25	B	93	25	C	83
00+690	00+720	24	A	83	24	B	83	24	C	83
00+660	00+690	23	A	84	23	B	94	23	C	83
00+630	00+660	22	A	85	22	B	94	22	C	79
00+600	00+630	21	A	85	21	B	93	21	C	83
00+570	00+600	20	A	85	20	B	94	20	C	83
00+540	00+570	19	A	84	19	B	94	19	C	83
00+510	00+540	18	A	85	18	B	90	18	C	83
00+480	00+510	17	A	83	17	B	94	17	C	79
00+450	00+480	16	A	92	16	B	94	16	C	83
00+420	00+450	15	A	88	15	B	94	15	C	83
00+390	00+420	14	A	93	14	B	94	14	C	83
00+360	00+390	13	A	93	13	B	90	13	C	83
00+330	00+360	12	A	93	12	B	93	12	C	85
00+300	00+330	11	A	92	11	B	93	11	C	84
00+270	00+300	10	A	92	10	B	88	10	C	93
00+240	00+270	9	A	92	9	B	88	9	C	93
00+210	00+240	8	A	93	8	B	93	8	C	93
00+180	00+210	7	A	93	7	B	93	7	C	83
00+150	00+180	6	A	86	6	B	93	6	C	93
00+120	00+150	5	A	86	5	B	93	5	C	83
00+090	00+120	4	A	86	4	B	93	4	C	84
00+060	00+090	3	A	84	3	B	93	3	C	83
00+030	00+060	2	A	89	2	B	89	2	C	93
00+000	00+030	1	A	91	1	B	93	1	C	93

Anexo 2. Datos PCI (filtrado)

Tabla 38. Anexo 2 – PCI 2013 (filtrado) Pista de aterrizaje, Aeropuerto de Cajamarca

Fuente: Elaboración propia

2013 (FILTRADO)										
PROGRESIVA		UNIDAD		PCI	UNIDAD		PCI	UNIDAD		PCI
02+490	02+520	84	A	65	84	B	59	84	C	64
02+460	02+490	83	A	70	83	B	68	83	C	66
02+430	02+460	82	A	69	82	B	58	82	C	63
02+400	02+430	81	A	69	81	B	58	81	C	63
02+370	02+400	80	A	70	80	B	58	80	C	63
02+340	02+370	79	A	70	79	B	58	79	C	63
02+310	02+340	78	A	70	78	B	58	78	C	63
02+280	02+310	77	A	69	77	B	66	77	C	66
02+250	02+280	76	A	69	76	B	58	76	C	63
02+220	02+250	75	A	69	75	B	66	75	C	66
02+190	02+220	74	A	69	74	B	58	74	C	63
02+160	02+190	73	A	68	73	B	66	73	C	66
02+130	02+160	72	A	69	72	B	67	72	C	66
02+100	02+130	71	A	69	71	B	69	71	C	69
02+070	02+100	70	A	69	70	B	58	70	C	63
02+040	02+070	69	A	69	69	B	68	69	C	63
02+010	02+040	68	A	70	68	B	66	68	C	63
01+980	02+010	67	A	70	67	B	58	67	C	63
01+950	01+980	66	A	70	66	B	58	66	C	58
01+920	01+950	65	A	70	65	B	66	65	C	66
01+890	01+920	64	A	70	64	B	58	64	C	58
01+860	01+890	63	A	70	63	B	62	63	C	58
01+830	01+860	62	A	70	62	B	69	62	C	58
01+800	01+830	61	A	69	61	B	66	61	C	63
01+770	01+800	60	A	69	60	B	69	60	C	66
01+740	01+770	59	A	69	59	B	64	59	C	69
01+710	01+740	58	A	70	58	B	65	58	C	70
01+680	01+710	57	A	70	57	B	66	57	C	67
01+650	01+680	56	A	70	56	B	66	56	C	67
01+620	01+650	55	A	69	55	B	58	55	C	58
01+590	01+620	54	A	70	54	B	69	54	C	69
01+560	01+590	53	A	69	53	B	66	53	C	66
01+530	01+560	52	A	69	52	B	58	52	C	66
01+500	01+530	51	A	69	51	B	69	51	C	58
01+470	01+500	50	A	69	50	B	58	50	C	58
01+440	01+470	49	A	69	49	B	70	49	C	58
01+410	01+440	48	A	65	48	B	70	48	C	64
01+380	01+410	47	A	65	47	B	70	47	C	66

2013 (FILTRADO)										
PROGRESIVA		UNIDAD		PCI	UNIDAD		PCI	UNIDAD		PCI
01+350	01+380	46	A		46	B	58	46	C	58
01+320	01+350	45	A	67	45	B	58	45	C	69
01+290	01+320	44	A	67	44	B	58	44	C	66
01+260	01+290	43	A	66	43	B	58	43	C	58
01+230	01+260	42	A	70	42	B	58	42	C	63
01+200	01+230	41	A	70	41	B	58	41	C	63
01+170	01+200	40	A	69	40	B	58	40	C	70
01+140	01+170	39	A	68	39	B	58	39	C	66
01+110	01+140	38	A	70	38	B	70	38	C	58
01+080	01+110	37	A	70	37	B	68	37	C	58
01+050	01+080	36	A	68	36	B	64	36	C	67
01+020	01+050	35	A	70	35	B	69	35	C	58
00+990	01+020	34	A	70	34	B	70	34	C	63
00+960	00+990	33	A	70	33	B	70	33	C	66
00+930	00+960	32	A	70	32	B	70	32	C	63
00+900	00+930	31	A	69	31	B	70	31	C	63
00+870	00+900	30	A	69	30	B	70	30	C	63
00+840	00+870	29	A		29	B	70	29	C	58
00+810	00+840	28	A		28	B	70	28	C	58
00+780	00+810	27	A	69	27	B	69	27	C	69
00+750	00+780	26	A	66	26	B	64	26	C	64
00+720	00+750	25	A	70	25	B	70	25	C	58
00+690	00+720	24	A	69	24	B	66	24	C	66
00+660	00+690	23	A	69	23	B	58	23	C	63
00+630	00+660	22	A	70	22	B	58	22	C	69
00+600	00+630	21	A	70	21	B	66	21	C	65
00+570	00+600	20	A	68	20	B	58	20	C	58
00+540	00+570	19	A	66	19	B	69	19	C	64
00+510	00+540	18	A	69	18	B	58	18	C	58
00+480	00+510	17	A	63	17	B	58	17	C	63
00+450	00+480	16	A	58	16	B	58	16	C	58
00+420	00+450	15	A	69	15	B	58	15	C	67
00+390	00+420	14	A	69	14	B	58	14	C	69
00+360	00+390	13	A	68	13	B	66	13	C	66
00+330	00+360	12	A	69	12	B	58	12	C	63
00+300	00+330	11	A	69	11	B	68	11	C	65
00+270	00+300	10	A	66	10	B	68	10	C	63
00+240	00+270	9	A	58	9	B	58	9	C	63
00+210	00+240	8	A	59	8	B	59	8	C	58
00+180	00+210	7	A	59	7	B	59	7	C	59
00+150	00+180	6	A	58	6	B	68	6	C	69
00+120	00+150	5	A	69	5	B	67	5	C	63
00+090	00+120	4	A	69	4	B	58	4	C	63

2013 (FILTRADO)							
PROGRESIVA		UNIDAD	PCI	UNIDAD	PCI	UNIDAD	PCI
00+060	00+090	3 A	69	3 B	58	3 C	63
00+030	00+060	2 A	69	2 B	58	2 C	58
00+000	00+030	1 A	67	1 B	59	1 C	63

Tabla 39. Anexo 2 – PCI 2014 (filtrado) Pista de aterrizaje, Aeropuerto de Cajamarca

Fuente: Elaboración propia

2014 (FILTRADO)							
PROGRESIVA		UNIDAD	PCI	UNIDAD	PCI	UNIDAD	PCI
00+000	00+030	1 PII	82	1 PIC	93	1 PID	86
00+030	00+060	2 PII	84	2 PIC	96	2 PID	79
00+060	00+090	3 PII	84	3 PIC	93	3 PID	84
00+090	00+120	4 PII	83	4 PIC	89	4 PID	84
00+120	00+150	5 PII	83	5 PIC	94	5 PID	84
00+150	00+180	6 PII	80	6 PIC	87	6 PID	83
00+180	00+210	7 PII	79	7 PIC	90	7 PID	84
00+210	00+240	8 PII	79	8 PIC	90	8 PID	84
00+240	00+270	9 PII	85	9 PIC	97	9 PID	79
00+270	00+300	10 PII	85	10 PIC	93	10 PID	86
00+300	00+330	11 PII	86	11 PIC	90	11 PID	86
00+330	00+360	12 PII	83	12 PIC	86	12 PID	86
00+360	00+390	13 PII	80	13 PIC	91	13 PID	87
00+390	00+420	14 PII	84	14 PIC	89	14 PID	83
00+420	00+450	15 PII	84	15 PIC	86	15 PID	86
00+450	00+480	16 PII	82	16 PIC	97	16 PID	86
00+480	00+510	17 PII	82	17 PIC	84	17 PID	85
00+510	00+540	18 PII	86	18 PIC	90	18 PID	82
00+540	00+570	19 PII	87	19 PIC	83	19 PID	84
00+570	00+600	20 PII	84	20 PIC	86	20 PID	81
00+600	00+630	21 PII	87	21 PIC	85	21 PID	84
00+630	00+660	22 PII	87	22 PIC	90	22 PID	
00+660	00+690	23 PII	85	23 PIC	94	23 PID	84
00+690	00+720	24 PII	84	24 PIC	85	24 PID	85
00+720	00+750	25 PII	88	25 PIC	91	25 PID	90
00+750	00+780	26 PII	85	26 PIC	95	26 PID	89
00+780	00+810	27 PII	81	27 PIC	86	27 PID	89
00+810	00+840	28 PII	86	28 PIC	88	28 PID	87
00+840	00+870	29 PII	84	29 PIC	91	29 PID	85
00+870	00+900	30 PII	86	30 PIC	88	30 PID	86
00+900	00+930	31 PII	82	31 PIC	85	31 PID	88
00+930	00+960	32 PII	80	32 PIC	85	32 PID	87
00+960	00+990	33 PII	86	33 PIC	83	33 PID	87

2014 (FILTRADO)										
PROGRESIVA		UNIDAD		PCI	UNIDAD		PCI	UNIDAD		PCI
00+990	01+020	34	PII	82	34	PIC	91	34	PID	86
01+020	01+050	35	PII	82	35	PIC	94	35	PID	88
01+050	01+080	36	PII	85	36	PIC	89	36	PID	87
01+080	01+110	37	PII	87	37	PIC	96	37	PID	85
01+110	01+140	38	PII	86	38	PIC	94	38	PID	88
01+140	01+170	39	PII	86	39	PIC	94	39	PID	90
01+170	01+200	40	PII	87	40	PIC	88	40	PID	90
01+200	01+230	41	PII	84	41	PIC	88	41	PID	86
01+230	01+260	42	PII	85	42	PIC	93	42	PID	88
01+260	01+290	43	PII	83	43	PIC	84	43	PID	88
01+290	01+320	44	PII	83	44	PIC	84	44	PID	85
01+320	01+350	45	PII	86	45	PIC	86	45	PID	79
01+350	01+380	46	PII	79	46	PIC	94	46	PID	84
01+380	01+410	47	PII	86	47	PIC	81	47	PID	87
01+410	01+440	48	PII	82	48	PIC	85	48	PID	87
01+440	01+470	49	PII	86	49	PIC	86	49	PID	82
01+470	01+500	50	PII	85	50	PIC	84	50	PID	86
01+500	01+530	51	PII	83	51	PIC	86	51	PID	81
01+530	01+560	52	PII	84	52	PIC	86	52	PID	81
01+560	01+590	53	PII	81	53	PIC	81	53	PID	83
01+590	01+620	54	PII	83	54	PIC	93	54	PID	85
01+620	01+650	55	PII	85	55	PIC	93	55	PID	83
01+650	01+680	56	PII	82	56	PIC	93	56	PID	84
01+680	01+710	57	PII	85	57	PIC	93	57	PID	81
01+710	01+740	58	PII	80	58	PIC	93	58	PID	84
01+740	01+770	59	PII	85	59	PIC	93	59	PID	86
01+770	01+800	60	PII	81	60	PIC	88	60	PID	84
01+800	01+830	61	PII	80	61	PIC	94	61	PID	84
01+830	01+860	62	PII	84	62	PIC	94	62	PID	88
01+860	01+890	63	PII	84	63	PIC	93	63	PID	87
01+890	01+920	64	PII	85	64	PIC	94	64	PID	83
01+920	01+950	65	PII	82	65	PIC	94	65	PID	82
01+950	01+980	66	PII	85	66	PIC	90	66	PID	81
01+980	02+010	67	PII	79	67	PIC	94	67	PID	84
02+010	02+040	68	PII	92	68	PIC	90	68	PID	80
02+040	02+070	69	PII	84	69	PIC	94	69	PID	83
02+070	02+100	70	PII	93	70	PIC	94	70	PID	88
02+100	02+130	71	PII	93	71	PIC	90	71	PID	85
02+130	02+160	72	PII	93	72	PIC	93	72	PID	85
02+160	02+190	73	PII	92	73	PIC	93	73	PID	87
02+190	02+220	74	PII	92	74	PIC	84	74	PID	93
02+220	02+250	75	PII	92	75	PIC	88	75	PID	93
02+250	02+280	76	PII	93	76	PIC	93	76	PID	93

2014 (FILTRADO)										
PROGRESIVA		UNIDAD		PCI	UNIDAD		PCI	UNIDAD		PCI
02+280	02+310	77	PII	93	77	PIC	93	77	PID	79
02+310	02+340	78	PII	86	78	PIC	98	78	PID	89
02+340	02+370	79	PII	85	79	PIC	93	79	PID	87
02+370	02+400	80	PII	86	80	PIC	89	80	PID	85
02+400	02+430	81	PII	85	81	PIC	93	81	PID	87
02+430	02+460	82	PII	89	82	PIC	87	82	PID	93
02+460	02+490	83	PII	91	83	PIC	93	83	PID	93
02+490	02+520									

Tabla 40. Anexo 2 – PCI 2015 (filtrado) Pista de aterrizaje, Aeropuerto de Cajamarca

Fuente: Elaboración propia

2015 (FILTRADO)										
PROGRESIVA		UNIDAD		PCI	UNIDAD		PCI	UNIDAD		PCI
00+000	00+030	83	A	82	83	B	83	83	C	86
00+030	00+060	82	A	83	82	B	83	82	C	79
00+060	00+090	81	A	76	81	B	83	81	C	83
00+090	00+120	80	A		80	B	83	80	C	83
00+120	00+150	79	A	83	79	B	83	79	C	83
00+150	00+180	78	A	80	78	B	83	78	C	83
00+180	00+210	77	A	79	77	B	83	77	C	83
00+210	00+240	76	A	79	76	B	83	76	C	78
00+240	00+270	75	A	83	75	B	84	75	C	79
00+270	00+300	74	A	83	74	B	85	74	C	83
00+300	00+330	73	A	83	73	B	85	73	C	83
00+330	00+360	72	A	78	72	B	84	72	C	84
00+360	00+390	71	A	80	71	B	81	71	C	83
00+390	00+420	70	A	83	70	B	81	70	C	79
00+420	00+450	69	A	77	69	B	83	69	C	79
00+450	00+480	68	A	82	68	B	83	68	C	80
00+480	00+510	67	A	82	67	B	83	67	C	83
00+510	00+540	66	A	83	66	B	83	66	C	80
00+540	00+570	65	A	83	65	B	83	65	C	83
00+570	00+600	64	A	83	64	B	83	64	C	81
00+600	00+630	63	A	83	63	B	84	63	C	83
00+630	00+660	62	A	83	62	B	84	62	C	78
00+660	00+690	61	A	83	61	B	85	61	C	79
00+690	00+720	60	A	83	60	B	79	60	C	79
00+720	00+750	59	A	83	59	B	83	59	C	83
00+750	00+780	58	A	84	58	B	84	58	C	83
00+780	00+810	57	A	80	57	B	86	57	C	83
00+810	00+840	56	A	83	56	B	82	56	C	83

2015 (FILTRADO)							
PROGRESIVA		UNIDAD	PCI	UNIDAD	PCI	UNIDAD	PCI
00+840	00+870	55 A	83	55 B	84	55 C	83
00+870	00+900	54 A	83	54 B	84	54 C	83
00+900	00+930	53 A	82	53 B	84	53 C	80
00+930	00+960	52 A	80	52 B	83	52 C	83
00+960	00+990	51 A	83	51 B	83	51 C	83
00+990	01+020	50 A	82	50 B	84	50 C	83
01+020	01+050	49 A	82	49 B	82	49 C	83
01+050	01+080	48 A	83	48 B	84	48 C	83
01+080	01+110	47 A	83	47 B	85	47 C	83
01+110	01+140	46 A	83	46 B	82	46 C	83
01+140	01+170	45 A	80	45 B	86	45 C	83
01+170	01+200	44 A	83	44 B	84	44 C	83
01+200	01+230	43 A	83	43 B	83	43 C	83
01+230	01+260	42 A	83	42 B	82	42 C	84
01+260	01+290	41 A	83	41 B	82	41 C	83
01+290	01+320	40 A	78	40 B	83	40 C	83
01+320	01+350	39 A	83	39 B	83	39 C	79
01+350	01+380	38 A	79	38 B	85	38 C	83
01+380	01+410	37 A	76	37 B	81	37 C	83
01+410	01+440	36 A	82	36 B	80	36 C	83
01+440	01+470	35 A	83	35 B	81	35 C	82
01+470	01+500	34 A	83	34 B	79	34 C	83
01+500	01+530	33 A	83	33 B	79	33 C	81
01+530	01+560	32 A	76	32 B	82	32 C	81
01+560	01+590	31 A	81	31 B	81	31 C	83
01+590	01+620	30 A	77	30 B		30 C	83
01+620	01+650	29 A	83	29 B	79	29 C	83
01+650	01+680	28 A	80	28 B	86	28 C	83
01+680	01+710	27 A	83	27 B	83	27 C	81
01+710	01+740	26 A	80	26 B	81	26 C	83
01+740	01+770	25 A	78	25 B	84	25 C	83
01+770	01+800	24 A	81	24 B	83	24 C	83
01+800	01+830	23 A	80	23 B	78	23 C	83
01+830	01+860	22 A	84	22 B	83	22 C	79
01+860	01+890	21 A	84	21 B	79	21 C	83
01+890	01+920	20 A	79	20 B	78	20 C	74
01+920	01+950	19 A	82	19 B	83	19 C	82
01+950	01+980	18 A	80	18 B	83	18 C	81
01+980	02+010	17 A	79	17 B	83	17 C	79
02+010	02+040	16 A	78	16 B	85	16 C	80
02+040	02+070	15 A	84	15 B	79	15 C	74
02+070	02+100	14 A	76	14 B	87	14 C	83
02+100	02+130	13 A	82	13 B	82	13 C	83

2015 (FILTRADO)							
PROGRESIVA		UNIDAD	PCI	UNIDAD	PCI	UNIDAD	PCI
02+130	02+160	12 A	76	12 B	87	12 C	85
02+160	02+190	11 A	83	11 B	82	11 C	84
02+190	02+220	10 A	75	10 B	84	10 C	87
02+220	02+250	9 A	84	9 B	78	9 C	84
02+250	02+280	8 A	77	8 B	80	8 C	87
02+280	02+310	7 A	81	7 B	79	7 C	79
02+310	02+340	6 A	86	6 B	93	6 C	89
02+340	02+370	5 A	85	5 B	87	5 C	83
02+370	02+400	4 A	86	4 B	89	4 C	84
02+400	02+430	3 A	84	3 B	80	3 C	83
02+430	02+460	2 A	84	2 B	87	2 C	80
02+460	02+490	1 A	83	1 B	88	1 C	76
02+490	02+520						

Anexo 3. Cálculo del tamaño de la muestra

Se tiene que la muestra es "04" de un universo de "20" (tiempo de vida útil de diseño del pavimento), haremos uso de la estadística inferencial para determinar el tamaño mínimo de la muestra.

La fórmula general para el tamaño de muestra "n" necesario para asegurar una extensión de intervalo "w", es:

$$n = \left(2z \cdot \frac{\sigma}{w}\right)^2$$

Ec. 16. Fórmula general para cálculo del tamaño de muestra

Fuente: [Devore Jay, 2005].

Donde:

n= Tamaño mínimo de la muestra

z= 2.58, para un intervalo de confianza del 99%

w= 100, rango de valores PCI (0 -100)

σ= Desviación estándar, 26.92 (ver Anexo 4)

Por lo tanto reemplazando valores en la Ec.16, tenemos:

$$n = 1.93 \sim 2 \text{ datos como mínimo}$$

Anexo 4. Test de normalidad Shapiro-wilk: Deterioro del pavimento

Con los datos obtenidos de las cadenas de Markov, cuyo pronóstico fue validado en el Capítulo V con datos obtenidos en campo, se simuló el comportamiento del pavimento durante su vida útil de diseño (20 años); los valores PCI obtenidos (ver Tabla 22) representan el deterioro del pavimento a través del tiempo y tienen un comportamiento normal (nivel de significancia 5%), tal como se verifica con el test de Shapiro-Wilk:

Shapiro-Wilk Normality Test

Shapiro, S. S. and Wilk, M. B. (1965). "Analysis of variance test for normality (complete samples)", *Biometrika* 52:
Online version implemented by [Simon Dittami](#) (2009)

Paste data here: (results below)

98
96
94
91
88
85
81
76
71
65
59
53
47
42
37
33
30
26
24

Calculate Clear all

Results:

n = 20
Mean = 60.85
SD = 26.919519429510427
W = 0.915360224145826

Threshold (p=0.01) = 0.8679999709129333 --> H0 accepted
Threshold (p=0.05) = 0.9049999713897705 --> H0 accepted

Resultados obtenidos de la herramienta online:

<http://sdittami.altervista.org/shapirotest/ShapiroTest.html>.

Anexo 5. Test de normalidad Shapiro-wilk: Inflación de precios

Los datos de los 5 últimos años de inflación del BCRP (ver Tabla 29) tienen un comportamiento normal (nivel de significancia 5%), tal como se verifica con el test de Shapiro-Wilk:

Shapiro-Wilk Normality Test

Shapiro, S. S. and Wilk, M. B. (1965). "Analysis of variance test for normality (complete samples)", *Biometrika* 52:
Online version implemented by [Simon Dittami](#) (2009)

Paste data here: (results below)

```
1.91
2.97
2.51
3.49
2.87
```

Calculate Clear all

Results:

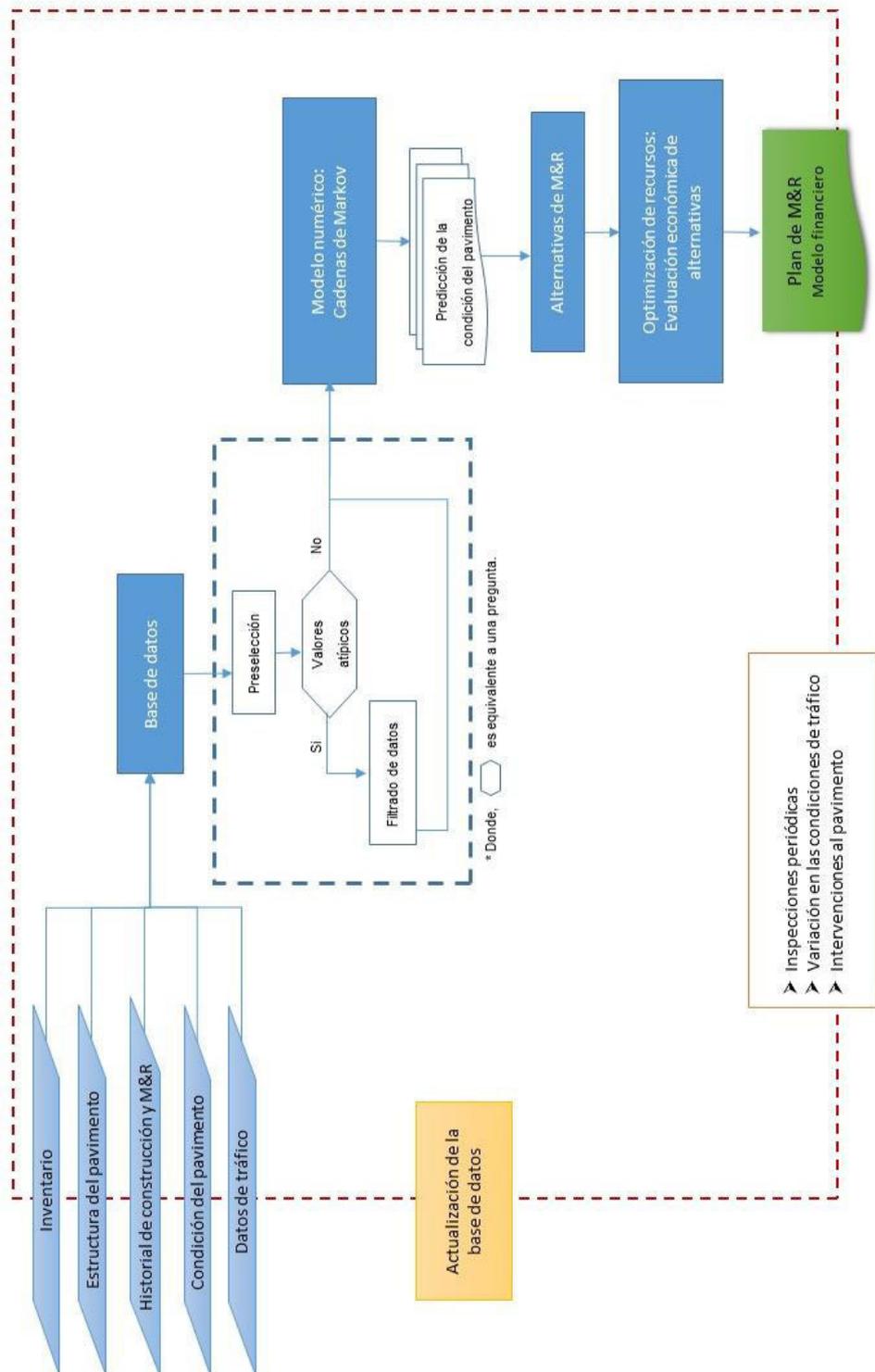
```
n = 5
Mean = 2.75
SD = 0.5860034129593445
W = 0.981416942413904

Threshold (p=0.01) = 0.6859999895095825 --> H0 accepted
Threshold (p=0.05) = 0.7620000243186951 --> H0 accepted
```

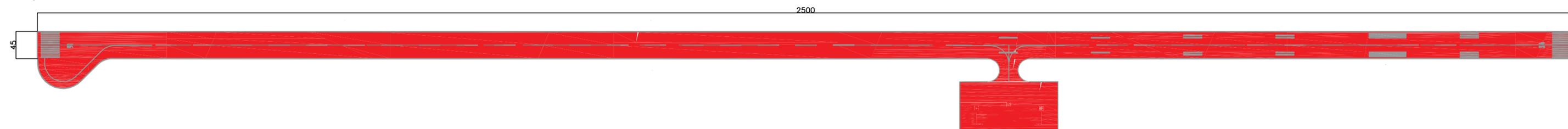
Resultados obtenidos de la herramienta online:

<http://sdittami.altervista.org/shapirotest/ShapiroTest.html>.

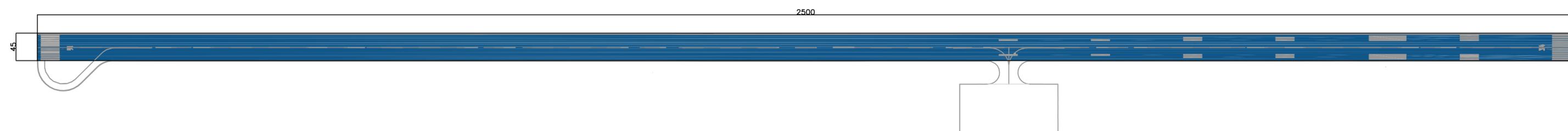
Anexo 6. Implementación de SGPA



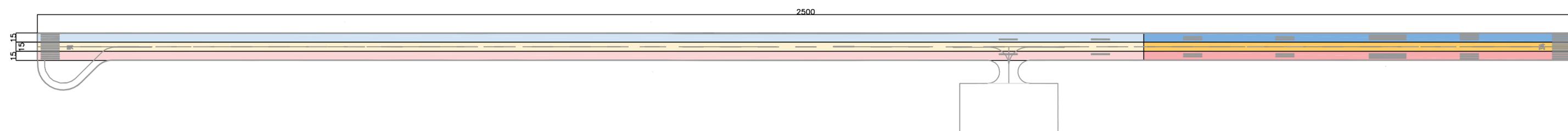
Anexo 7. Plano de la red de pavimentos con fines de SGPA



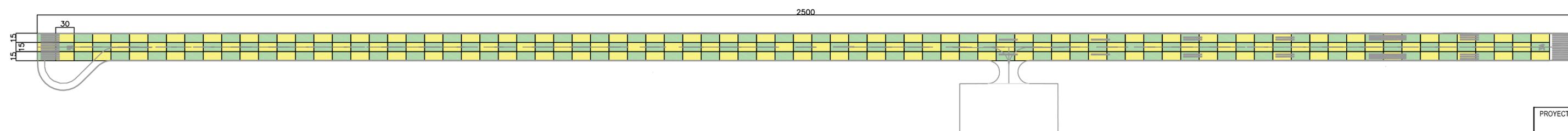
Red de pavimentos del área de movimiento



Componente pista de aterrizaje



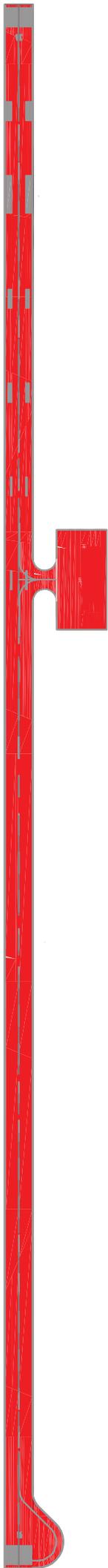
- Sección 101
- Sección 102
- Sección 103
- Sección 104
- Sección 105
- Sección 106



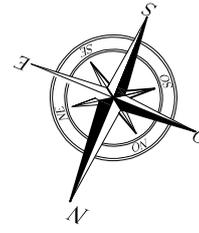
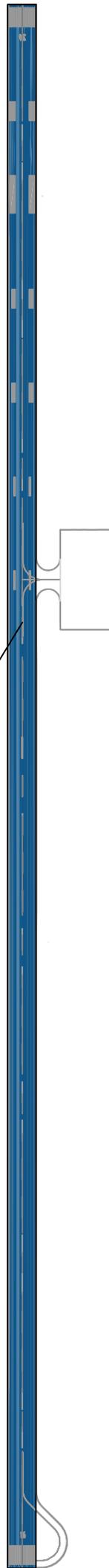
Unidades de muestra (30 m x 15 m)

PROYECTO:	
IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE GESTIÓN DE PAVIMENTOS PARA EL ÁREA DE MOVIMIENTO DEL AEROPUERTO DE CAJAMARCA	
ELABORA:	
KAREN ANGELA CAMARENA CAMPOS	
ESCALA:	FECHA:
1/500	OCTUBRE 2017

ÁREA DE MOVIMIENTO



RWY 16-34



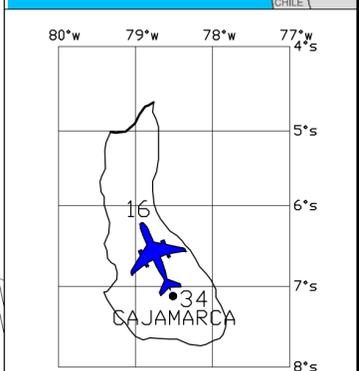
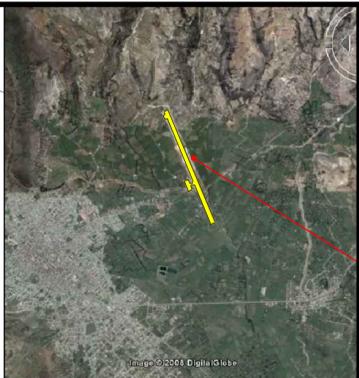
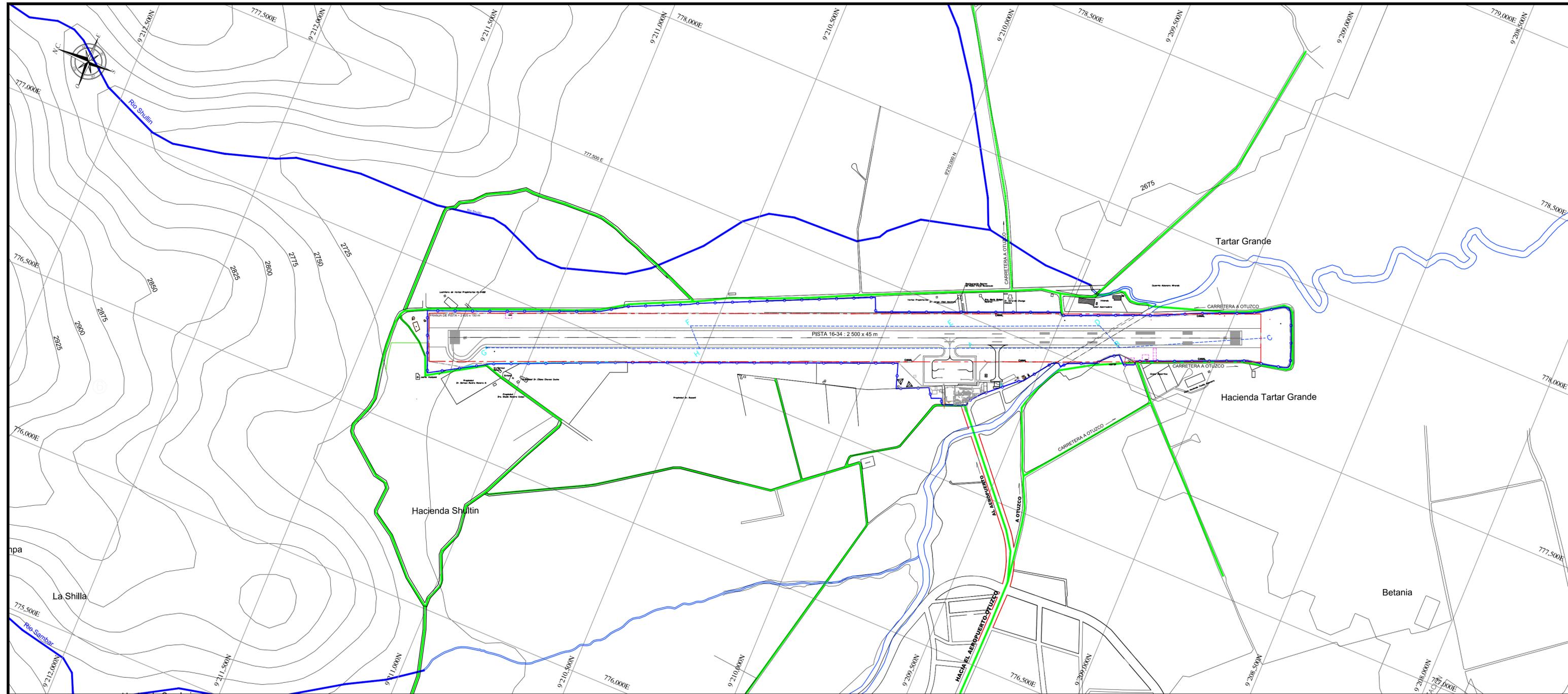
PAVIMENTOS DEL AEROPUERTO DE CAJAMARCA

MANTENIMIENTO RECOMENDADO:

-  Sellado de fisuras + Slurry asfáltico superficial

APÉNDICES

Apéndice 1. Plano de ubicación y localización - Aeropuerto de Cajamarca



- LEYENDA:
- 261± CURVAS A NIVEL, COTA
 - CAMINOS, VIAS
 - RIOS
 - PUEBLO - CAMPAMENTO

COORDENADAS ARP
 07°08'21.20" S
 78°29'22.30" W

REGION : CAJAMARCA
 PROVINCIA : CAJAMARCA
 DISTRITO : BAÑOS DEL INCA

AREA DE CONCESION (ADP) = 497 463,03 m²

AREA INSCRITA (CORPAC) = 537 949,39 m²

REV. N°	FECHA	DESCRIPCION DE LA REVISION	PROY.	ADP	OSI
5	11/12	PARA APROBACION			
4	05/11	PARA APROBACION			
3	02/11	PARA APROBACION			
2	03/09	PARA APROBACION			
1	11/08	PARA APROBACION			
0	06/08	PARA APROBACION			

RESPONSABLES:	FECHA	FIRMA
DISEÑADO POR: ARO. MARÍA DEL PILAR PANIZO	NOVIEMBRE 2012	
REVISADO POR: DGAC - MTC	NOVIEMBRE 2012	
APROBADO POR: DGAC - MTC	NOVIEMBRE 2012	

PROYECTO: PLANES MAESTROS DE LOS AEROPUERTOS DE PROVINCIAS DEL PERU

SUB-PROYECTO: AEROPUERTO DE CAJAMARCA

INVENTARIO (Cap. II)
 UBICACION Y LOCALIZACION



ESCALA:	1/7 500	FECHA:	NOVIEMBRE 2012
PLANO N°:	2.1	NUMERO DE REVISION:	5

(DATUM: UTM-WGS 84)

Apéndice 2. Análisis de precios unitarios de intervenciones de M&R

COSTOS UNITARIOS DE INTERVENCIONES DE MANTENIMIENTO A LOS PAVIMENTOS

Fuente : [DGAC]

ACTIVIDAD	UNIDAD	COSTO DIRECTO
MANTENIMIENTO PREVENTIVO RUTINARIO		
LIMPIEZA DE PAVIMENTO ASFÁLTICO	M2	\$ 2.38
MANTENIMIENTO PREVENTIVO PERIÓDICO		
SELLADO DE FISURAS Y GRIETAS	M	\$ 9.50
IMPERMEABILIZACIÓN CONTRA DERRAMES	M2	\$ 16.53
SLURRY ASFÁLTICO SUPERFICIAL	M2	\$ 10.78
REPOSICIÓN DE PINTURA O SEÑALIZACIÓN	M2	\$ 13.85
MANTENIMIENTO CORRECTIVO		
SELLADO DE FISURAS Y GRIETAS	M	\$ 9.50
RECAPEO 1" EN PAVIMENTOS CON SUPERFICIES ASFÁLTICAS	M2	\$ 24.83
REPOSICIÓN DE PINTURA O SEÑALIZACIÓN	M2	\$ 13.85

Sub Partida:

SELLADOR EN CALIENTE TIPO FOG SEAL

ITEM:

Unidad:

m2

Rendimiento

2250

Nº	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANT.	PRECIO [\$.]	TOTAL [\$.]
1.	Mano de Obra				
1.1	Operario	hh	0.0120	6.24	0.07
1.2	Oficial	hh	0.0240	5.35	0.13
1.3	Capataz	hh	0.0240	7.80	0.19
1.4	Peón	hh	0.1200	4.82	0.58
	SUB-TOTAL				0.97
2.	Materiales				
2.1	Transporte de material	glb	2.0000	0.31	0.62
2.2	Sello en caliente tipo Fog Seal	m2	1.0500	8.50	8.93
	SUB-TOTAL				9.55
3.	Equipos				
3.1	Herramientas manuales	%mo	3%	0.97	0.03
3.2	Rodillo liso vibratorio autopropulsado 7-9ton	hm	0.0107	60.60	0.65
3.3	Pavimentadora para Fog seal	hm	0.0107	106.45	1.14
	SUB-TOTAL				1.82
TOTAL COSTOS DIRECTOS				[\$.]	12.33

ANALISIS DE PRECIOS UNITARIOS

Zona:

CAJAMARCA

Partida:

SLURRY ASFÁLTICO SUPERFICIAL

ITEM:

Unidad:

m2

Rendimiento

2250

Nº	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANT.	PRECIO [\$.]	TOTAL [\$.]
1.	Materiales				
1.1	EPP y señalización en obra	%pu	2%	10.57	0.21
	SUB-TOTAL				0.21
2.	Subpartidas				
2.1	Limpieza de pavimento asfáltico	m2	1.0000	2.38	2.38
2.2	Movilización y desmovilización de equipos	glb	1.0000	1.50	1.50
2.3	Slurry asfáltico superficial	m2	1.0000	6.70	6.70
	SUB-TOTAL				10.57
TOTAL COSTOS DIRECTOS				[\$.]	10.78

ANALISIS DE PRECIOS UNITARIOS DE SUBPARTIDAS

Sub Partida:

LIMPIEZA DE PAVIMENTO ASFÁLTICO

ITEM:

Unidad:

m2

Rendimiento

72

Nº	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANT.	PRECIO [\$.]	TOTAL [\$.]
1.	Mano de Obra				
1.1	Operario	hh	0.0110	6.24	0.07
1.2	Peón	hh	0.4400	4.82	2.12
	SUB-TOTAL				2.19
2.	Herramientas				
2.1	Herramientas manuales	%mo	5%	2.19	0.11
	SUB-TOTAL				0.11
3.	Maquinaria y Equipos				
3.1	Compresora de aire	hm	0.0030	26.22	0.08
	SUB-TOTAL				0.08
TOTAL COSTOS DIRECTOS				[\$.]	2.38

Sub Partida:

MOVILIZACIÓN Y DESMOVILIZACIÓN
DE EQUIPOS

ITEM:

Unidad:

glb

Rendimiento

1

Nº	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANT.	PRECIO [\$.]	TOTAL [\$.]
1.	Materiales				
1.1	Flete terrestre	glb	1.00	1.50	1.50
	SUB-TOTAL				1.50
TOTAL COSTOS DIRECTOS				[\$.]	1.50

Sub Partida:

SLURRY ASFÁLTICO SUPERFICIAL

ITEM:

Unidad:

m2

Rendimiento

36

Nº	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANT.	PRECIO [\$.]	TOTAL [\$.]
1.	Mano de Obra				
1.1	Operario	hh	0.0120	6.24	0.07
1.2	Oficial	hh	0.0240	5.35	0.13
1.3	Capataz	hh	0.0240	7.80	0.19
1.4	Peón	hh	0.1200	4.82	0.58
	SUB-TOTAL				0.97
2.	Materiales				
2.1	Transporte de material	glb	2.0000	0.31	0.62
2.2	slurry	m3	0.0140	235.00	3.29
	SUB-TOTAL				3.91
3.	Equipos				
3.1	Herramientas manuales	%mo	3%	0.97	0.03
3.2	Rodillo liso vibratorio autopropulsado 7-9ton	hm	0.0107	60.60	0.65
3.3	Pavimentadora para Slurry seal	hm	0.0107	106.45	1.14
	SUB-TOTAL				1.82
TOTAL COSTOS DIRECTOS				[\$.]	6.70

ANALISIS DE PRECIOS UNITARIOS

Zona:

CAJAMARCA

Partida:

REPOSICIÓN DE PINTURA O SEÑALIZACIÓN

ITEM:

Unidad:

m2

Rendimiento

36

Nº	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANT.	PRECIO [\$.]	TOTAL [\$.]
1.	Materiales				
1.1	Pintura para tráfico	gal	0.0625	22.75	1.42
1.2	Solvente de pintura de tráfico	gal	0.1000	16.67	1.67
1.3	Solvente XILOL	gal	0.1500	12.50	1.88
	SUB-TOTAL				4.96
2.	Mano de Obra				
2.1	Capataz	hh	0.0444	7.80	0.35
2.2	Operario	hh	0.2222	6.24	1.39
2.3	Oficial	hh	0.8889	5.35	4.76
2.4	Peón	hh	0.4444	4.82	2.14
	SUB-TOTAL				8.63
3.	Herramientas				
3.1	Herramientas manuales	%mo	3%	8.63	0.26
	SUB-TOTAL				0.26
TOTAL COSTOS DIRECTOS				[\$.]	13.85

Sub Partida:

RIEGO DE LIGA

ITEM:

Unidad: m2

Rendimiento

2250

Nº	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANT.	PRECIO [\$.]	TOTAL [\$.]
1.	Materiales				
1.1	Kerosene industrial	gal	0.0800	5.50	0.44
1.2	Asfalto RC-250	gal	0.5000	4.50	2.25
1.3	Transporte de material bituminoso	gal	1.0000	0.80	0.80
	SUB-TOTAL				3.49
2.	Equipos				
2.1	Camión imprimador 6x2 178-210 hp 1800gl	hm	0.0036	84.50	0.30
	SUB-TOTAL				0.30
3.	Mano de Obra				
3.1	Oficial	hh	0.0040	5.35	0.02
3.2	Capataz	hh	0.0008	7.80	0.01
3.3	Peón	hh	0.0080	4.82	0.04
	SUB-TOTAL				0.07
3.	Equipos				
3.1	Herramientas manuales	%mo	5%	0.07	0.00
	SUB-TOTAL				0.00
TOTAL COSTOS DIRECTOS				[\$.]	3.86

Sub Partida:

CARPETA ASFÁLTICA EN CALIENTE DE 1"

ITEM:

Unidad: m2

Rendimiento

2250

Nº	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANT.	PRECIO [\$.]	TOTAL [\$.]
1.	Materiales				
1.1	Mezcla asfáltica	m3	0.0358	225.00	8.06
1.2	Transporte de mezcla asfáltica desde planta	m3	0.0358	80.00	2.86
	SUB-TOTAL				10.92
2.	Equipos				
2.1	rodillo neumático autopropulsado 5.5 - 20ton	hm	0.0036	84.50	0.30
2.2	Rodillo tandem 8-10 ton	hm	0.0036	76.00	0.27
2.3	Pavimentadora sobre llantas	hm	0.0036	130.00	0.47
	SUB-TOTAL				1.05
3.	Mano de Obra				
3.1	Operario	hh	0.0100	6.24	0.06
3.2	Oficial	hh	0.0010	5.35	0.01
3.3	Capataz	hh	0.0001	7.80	0.00
3.4	Peón	hh	0.0400	4.82	0.19
	SUB-TOTAL				0.26
3.	Equipos				
3.1	Herramientas manuales	%mo	5%	0.26	0.01
	SUB-TOTAL				0.01
TOTAL COSTOS DIRECTOS				[\$.]	12.24

Sub Partida:

REMOCIÓN DE CAUCHO Y RETEXTURADO

ITEM:

Unidad:

m2

Rendimiento

2250

Nº	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANT.	PRECIO [\$.]	TOTAL [\$.]
1.	Materiales				
1.1	Agua	m3	0.1000	3.92	0.39
	SUB-TOTAL				0.39
2.	Equipos				
2.1	Maquina Ligua blaster	hm	0.0160	203.00	3.25
2.2	Caminoneta pick up 1ton	hm	0.0080	21.00	0.17
2.3	Camión volquete de 10 m3	hm	0.0160	85.40	1.37
2.4	Camión mixto (cisterna y recolector de residuos)	hm	0.0160	105.00	1.68
	SUB-TOTAL				6.46
3.	Mano de Obra				
3.1	Operario	hh	0.0080	6.24	0.05
3.2	Capataz	hh	0.0008	7.80	0.01
3.3	Peón	hh	0.0320	4.82	0.15
	SUB-TOTAL				0.21
3.	Equipos				
3.1	Herramientas manuales	%mo	5%	0.21	0.01
	SUB-TOTAL				0.01
TOTAL COSTOS DIRECTOS				[\$.]	7.08