SGIPA

Sistema de Gestão Integrado de Percursos e Atividades

Relatório sobre a Monitorização da Capacidade de Carga nos Percursos Naturais da Região Autónoma da Madeira

UNIVERSIDADE da MADEIRA
www.uma.pt

CiTUR
CENTRO DE INVESTIGAÇÃO, DESENVOLVIMENTO E INOVAÇÃO EM TURISMO

Equipa de Investigação CITUR MADEIRA

2026-01-30

Nota Inicial

O presente estudo não se limita à determinação de um valor estático de capacidade de carga para os percursos naturais da Região Autónoma da Madeira. Pelo contrário, propõe a construção e operacionalização de uma metodologia integrada de gestão, monitorização e acompanhamento contínuo, assente na recolha sistemática de dados empíricos, na análise dinâmica dos fluxos turísticos e na incorporação de múltiplos fatores territoriais, comportamentais e ambientais.

Num contexto em que os padrões de utilização dos percursos estão em permanente mutação — influenciados por variáveis como condições meteorológicas, sazonalidade, tendências digitais, acessibilidade e perceções dos visitantes — torna-se fundamental adotar um modelo adaptativo que permita ajustar regularmente os parâmetros operacionais e os limites recomendados de utilização. Neste sentido, a metodologia agora apresentada foi concebida como um sistema evolutivo, dependente da participação ativa das diferentes entidades intervenientes na gestão do território, garantindo a sua calibração contínua e a adequação às dinâmicas reais de utilização.

Assim, os valores iniciais definidos para cada percurso, constantes de uma primeira versão, devem ser entendidos como referenciais operacionais suscetíveis de revisão periódica, recomendando-se a sua reavaliação em ciclos regulares, nomeadamente de natureza semestral. Paralelamente, a integração de mecanismos de monitorização em tempo quase real permite a geração de alertas sempre que os fatores críticos previamente definidos — como níveis de ocupação, condições meteorológicas ou indicadores de segurança — se afastem dos intervalos considerados normais, possibilitando uma resposta preventiva e informada por parte das entidades gestoras.

Desta forma, o estudo estabelece as bases para uma governação adaptativa dos percursos naturais, promovendo a sustentabilidade ambiental, a segurança dos utilizadores e a qualidade da experiência turística, ao mesmo tempo que reforça a capacidade institucional de decisão sustentada em dados e evidência científica.

Índice

1. Introdução e Enquadramento Estratégico 8
   1.1. Contexto Global do Turismo de Natureza e Pressões Contemporâneas 8
   1.2. Especificidades Territoriais e Desafios de Gestão 8
   1.3. Limitações dos Modelos Tradicionais de Gestão 9
   1.4. Necessidade de Inovação Tecnológica e Científica 9
   1.5. Génese e Desenvolvimento do SGIPA 9
   1.6. Paradigma Conceptual e Inovação Metodológica 10
   1.7. Contributo Científico e Relevância Internacional 10
   1.8. Estrutura e Objetivos do Presente Relatório 10
   1.9. Relevância para a Política Pública e Gestão Territorial 11
   1.10. Perspetivas de Desenvolvimento Futuro 11
2. Diagnóstico Inicial e Linhas de Investigação 12
   2.1. Metodologia do Diagnóstico Institucional 12
   2.2. Identificação de Problemas Estruturais 12
   2.3. Definição das Linhas Estruturantes de Investigação 13
   2.3.1. Capacidade de carga multidimensional 13
   2.3.2. Monitorização em tempo real 13
   2.3.3. Desenvolvimento do produto turístico 14
   2.3.4. Segurança e gestão de ocorrências 14
3. Evolução Conceptual: da Capacidade de Carga Clássica ao LAC Dinâmico 15
   3.1. Fundamentos Históricos dos Modelos Clássicos 15
   3.2. Limitações dos Modelos Tradicionais 16
   3.3. Características da Realidade Contemporânea 16
   3.4. Integração de Tecnologias Digitais na Gestão Turística 18
   3.5. O Paradigma LAC no Contexto do SGIPA 18
   3.6. Integração de Múltiplas Dimensões de Análise 19
   3.7. Simulação Dinâmica e Modelação Preditiva 19
   3.8. Conclusão 20
4. Fundamentação Conceptual 22
   4.1. A Capacidade de Carga como Conceito Multidimensional 22
   4.2. A Dimensão Social da Experiência Turística 22
   4.3. O Crowding como Variável Comportamental 23
   4.4. Estruturação dos Cálculos Físicos e Reais 23

4.5. Integração das Dimensões de Conservação e Gestão 23
4.6. A Variável Espaço por Utilizador 23
5. Modelo Operacional do SGIPA: da Capacidade Teórica à Monitorização em Tempo Real 26
5.1. Modelo em cinco níveis 26
5.2. Caracterização Física do Percurso 26
5.3. Cálculo da Capacidade Simultânea Teórica 27
5.4. Rotação Diária Teórica 28
5.5. Capacidade Física Diária Teórica 29
5.6. Conversão para Capacidade Operacional Temporalizada 29
5.7. Sobreposição Temporal - Ocupação média por visitante 30
5.8. Visitantes por Slot 30
5.9. Capacidade Operacional Diária 32
5.10. Availability Person Error Factor (APE) 32
5.10.1. Cálculo do APE 32
5.10.2. Função do APE como indicador de calibração 33
5.10.3. Aplicação de Fatores de Correção 33
Fatores Ambientais 34
Fatores Operacionais 34
Fatores Infraestruturais 35
Fatores de Gestão 35
Fator Comportamental 35
5.10.4. Fórmula de ponderação adaptativa 38
5.10.5. Monitorização Empírica 39
5.10.6. Recálculo do tempo médio de permanência 39
5.10.7. Verificação de Conformidade 40
6. Baías Recreativas e Pontos de Interesse (POI) na Modelação Matemática da Capacidade de Carga em Percursos Naturais 41
6.1. Conceito Operacional de Ponto de Interesse (POI) 41
6.2. Formulação Matemática dos POI 41
6.3. Integração da Dimensão Temporal 42
6.3.1. Determinação do Elemento Restritivo 42
6.3.2. Implicações para a Gestão 42
6.4. Conclusão 43

7. Gestão Temporal da Capacidade – Justificação Científica dos Slots 44
7.1. Fundamentação dos Slots de 30 Minutos 44
7.2. Base conceptual: gestão da capacidade de carga temporal 44
7.3. Justificação temporal e comportamental 45
7.4. Relação com o modelo de predição e simulação 46
Síntese justificativa 46
8. Análise Estatística dos Padrões de Utilização: Estudo Comparativo de Percursos Monitorizados 47
8.1. Metodologia 47
8.2. Critérios de consistência metodológica 47
8.3. Harmonização dos dados 47
8.4. Caracterização da amostra 48
Volume absoluto de entradas 48
Médias diárias de entradas 49
8.5. Análise comparativa dos percursos 49
Perfil do PR8 — Vereda da Ponta de São Lourenço 49
Perfil do PR1 — Vereda do Areeiro 49
Perfil do PR9 — Levada do Caldeirão Verde 50
Perfil do PR11 — Vereda dos Balcões 50
8.6. Padrões horários de utilização 50
Concentração matinal transversal 50
Fatores explicativos da concentração matinal 50
8.6.1. Heatmaps de distribuição horária 51
8.7. Interpretação integrada dos resultados 54
8.7.1. Padrões transversais identificados 55
8.8. Conclusões da análise estatística dos quatro percursos monitorizados 55
8.9. Análise da média de permanência nos percursos monitorizados 56
9. Análise global da frequência dos percursos pedestres 60
9.1. Enquadramento metodológico 60
9.2. Estrutura global da procura 60
Interpretação da concentração da procura 61
10. Simulação Dinâmica de Percursos no SGIPA: Integração de Modelação Computacional e Inteligência Artificial 67
11. Projeto Piloto de Monitorização Inteligente no PR1 – Vereda do Areeiro 72

12. Arquitetura Modular do SGIPA 77
13. Conclusões Preliminares 84
13.1. Contributos Científicos 84
13.2. Inovações Metodológicas 85
13.3. Impactos Esperados 86

Índice de Tabelas

Tabela 1 — Padrões espaciais de capacidade de carga turística por contexto 24
Tabela 2 — Variáveis estruturais mínimas para caracterização física do percurso 27
Tabela 3-Fatores de Correção Integrados no Modelo SGIPA 37
Tabela 4 — Níveis conceptuais da capacidade de carga 43
Tabela 5 — Estrutura da base de dados harmonizada 48
Tabela 6— Volume total de entradas por percurso 48
Tabela 7—Média diária de entradas por percurso 49
Tabela 8 — Fatores explicativos da concentração matinal 51
Tabela 9 — Hierarquia de utilização dos quatro percursos monitorizados 54
Tabela 10 — Ranking final de utilização dos quatro percursos monitorizados 56
Tabela 11 — Média de permanência nos percursos monitorizados 57
Tabela 12 — Dimensão da base de dados global analisada 60
Tabela 13— Seis percursos mais frequentados da rede 61
Tabela 14 — Reservas, visitantes e média de visitantes por reserva 62
Tabela 15 — Distribuição mensal da frequência 63
Tabela 16 — Distribuição da frequência por dia da semana em Termos 63
Tabela 17-Menu de Geração de Simulação 68

Índice de Figuras

Figura 1 - Modelo de Dados Percurso – PR1 31
Figura 2 -PR 1 - Vereda do Areeiro 52
Figura 3- PR 8 - Vereda da Ponta de São Lourenço 52
Figura 4 - PR 9 - Levada do Caldeirão Verde 53
Figura 5 - PR 11 - Vereda dos Balcões 53
Figura 6 - PR 11 - Vereda dos Balcões 66
Figura 7 – Representação espacial da simulação sobre traçado georreferenciado 68
Figura 8 — Cenários comparativos de distanciamento entre visitantes. 69
Figura 9 — Impacto do tempo de permanência em POI na dinâmica do fluxo. 70
Figura 10— Integração da simulação com variáveis operacionais: tráfego, resgate e limites aceitáveis. 71
Figura 11 — Impacto do tempo de permanência em POI na dinâmica do fluxo. 72
Figura 12 — Dashboard de monitorização do PR1 com indicadores de entradas, saídas e percentagem de ocupação. 73
Figura 13 — Dashboard analítico com cruzamento de dados de fluxo turístico e variáveis meteorológicas no PR1. 74
Figura 14— Dashboard analítico da análise sentimento do PR1. 75
Figura 15 – Arquitetura Modular do SGIPA 77
Figura 16– Imagem Ilustrativa do Modelo IFCN 78
Figura 17 – Imagem Ilustrativa do Módulo Reservas 79
Figura 18 – Imagem Ilustrativa do Módulo Dashboard 80
Figura 19– Imagem Ilustrativa do Módulo Fatores de Correção 80
Figura 20– Imagem Ilustrativa do Módulo Protecção Civil 81
Figura 21– Imagem Ilustrativa do Módulo Gamificação 82

1. Introdução e Enquadramento Estratégico

1.1. Contexto Global do Turismo de Natureza e Pressões Contemporâneas

O turismo de natureza tem registado um crescimento exponencial nas últimas décadas, consolidando-se como um dos segmentos mais dinâmicos da indústria turística global. Esta tendência, amplificada pela crescente consciencialização ambiental e pela procura de experiências autênticas em contacto com a natureza, tem gerado pressões sem precedentes sobre ecossistemas frágeis e áreas naturais protegidas em todo o mundo. A Região Autónoma da Madeira, reconhecida pela UNESCO como Reserva da Biosfera e Património Mundial Natural devido à sua Floresta Laurissilva, não constitui exceção a esta realidade global.

O crescimento sustentado da procura turística pelos percursos naturais da Região Autónoma da Madeira tem vindo a colocar desafios crescentes ao nível da gestão da capacidade de carga, segurança operacional, sustentabilidade ambiental e qualidade da experiência turística. Esta pressão intensificou-se significativamente na última década, impulsionada pela digitalização da promoção turística, pelo aumento da conectividade aérea e pela crescente visibilidade internacional do destino Madeira como referência mundial em turismo de natureza.

1.2. Especificidades Territoriais e Desafios de Gestão

A geografia insular da Madeira, caracterizada por uma orografia complexa, elevada densidade populacional nas zonas costeiras e concentração da rede de percursos pedestres em áreas de elevado valor ecológico, amplifica os desafios associados à gestão sustentável dos fluxos turísticos. A rede de percursos classificados, composta por 33 trilhos oficiais que atravessam diferentes ecossistemas - desde a Floresta Laurissilva até às formações vulcânicas de altitude - constitui simultaneamente o principal ativo turístico da região e o seu elemento mais vulnerável em termos de conservação.

Os percursos mais emblemáticos, como a Vereda do Areeiro, a Levada das 25 Fontes, a Vereda da Ponta de São Lourenço e a Levada do Caldeirão Verde, têm registado níveis de utilização que, em determinados períodos e condições, se aproximam ou excedem os limites de capacidade de carga tradicionalmente estimados. Esta situação tem gerado preocupações crescentes entre gestores, investigadores e *stakeholders* locais,

evidenciando a necessidade urgente de instrumentos científicos e tecnológicos capazes de apoiar uma gestão mais eficaz e sustentável.

1.3. Limitações dos Modelos Tradicionais de Gestão

Os modelos tradicionais de gestão de percursos naturais, baseados predominantemente em estimativas estáticas de capacidade de carga e em sistemas de controlo passivo, têm revelado limitações significativas face à complexidade e dinamismo dos padrões contemporâneos de procura turística. A ausência de sistemas de monitorização em tempo real, a dificuldade em antecipar picos de procura e a limitada capacidade de resposta adaptativa têm contribuído para situações recorrentes de sobrecarga, com impactos negativos tanto na experiência dos visitantes como na integridade dos ecossistemas.

Adicionalmente, a influência crescente das redes sociais na promoção espontânea de destinos naturais tem introduzido um elemento de imprevisibilidade que os sistemas tradicionais de planeamento turístico não conseguem acomodar eficazmente. Fenómenos de "viral marketing" podem gerar picos súbitos de procura em percursos específicos, criando pressões concentradas que excedem largamente as previsões baseadas em dados históricos.

1.4. Necessidade de Inovação Tecnológica e Científica

Face a estes desafios, tornou-se evidente a necessidade de desenvolver abordagens inovadoras que integrem avanços tecnológicos, conhecimento científico atualizado e princípios de gestão adaptativa. A literatura internacional tem vindo a evidenciar o potencial das tecnologias digitais, da inteligência artificial e dos sistemas de monitorização em tempo real para revolucionar a gestão de destinos turísticos naturais, permitindo uma transição de modelos reativos para modelos preditivos e preventivos.

1.5. Génese e Desenvolvimento do SGIPA

Neste contexto, foi desenvolvido, em articulação entre a Universidade da Madeira, o Instituto das Florestas e Conservação da Natureza (IFCN) e a Secretaria Regional de Turismo, Ambiente e Cultura, o Sistema de Gestão Integrado de Percursos e Atividades (SGIPA), concebido como uma plataforma digital modular e escalável orientada para a monitorização, gestão e simulação dinâmica dos fluxos de visitantes em ambientes naturais.

O projeto SGIPA emergiu da constatação de que a gestão sustentável dos percursos naturais da Madeira exigia uma abordagem sistémica e integrada, capaz de articular múltiplas dimensões - ecológica, social, económica e tecnológica - numa plataforma operacional coerente. A iniciativa beneficiou do conhecimento acumulado pela

Universidade da Madeira em áreas como a ecologia da Laurissilva, o comportamento dos visitantes e a modelação de sistemas complexos, bem como da experiência operacional do IFCN na gestão quotidiana da rede de percursos.

1.6. Paradigma Conceptual e Inovação Metodológica

O SGIPA surge como evolução conceptual dos modelos clássicos de capacidade de carga turística, incorporando o paradigma dos Limits of Acceptable Change (LAC) e a integração de dados em tempo real, inteligência analítica e suporte à decisão operacional. Esta abordagem representa uma mudança paradigmática fundamental: em vez de procurar determinar limites fixos e universais de utilização, o sistema foca-se na definição de condições desejadas de uso e na monitorização contínua de indicadores que permitam avaliar se essas condições estão a ser mantidas.

A inovação metodológica do SGIPA reside na sua capacidade de integrar múltiplas fontes de dados - desde sensores de contagem automática até dados meteorológicos e informação comportamental dos visitantes - numa plataforma analítica que permite não apenas monitorizar o estado atual dos percursos, mas também simular cenários futuros e apoiar decisões de gestão em tempo real.

1.7. Contributo Científico e Relevância Internacional

O desenvolvimento do SGIPA constitui um contributo significativo para o corpo de conhecimento científico em áreas como a gestão de destinos turísticos sustentáveis, a aplicação de tecnologias digitais em conservação da natureza e a operacionalização de modelos teóricos de capacidade de carga. O sistema incorpora avanços recentes em áreas como a visão computacional, a análise de *big data* e a modelação preditiva, aplicando-os de forma integrada a um contexto territorial específico, mas com potencial de replicação noutros destinos com características similares.

A relevância internacional do projeto é evidenciada pelo interesse manifestado por organizações como a UNESCO, a Organização Mundial do Turismo e diversas universidades europeias especializadas em turismo sustentável, que têm acompanhado o desenvolvimento do SGIPA como potencial modelo de referência para a gestão de áreas naturais protegidas com elevada pressão turística.

1.8. Estrutura e Objetivos do Presente Relatório

O presente relatório científico tem como objetivo apresentar de forma sistemática e rigorosa os fundamentos teóricos, a metodologia operacional, os resultados preliminares e as implicações práticas do Sistema de Gestão Integrado de Percursos e

Atividades. O documento está estruturado de forma a proporcionar uma compreensão abrangente do projeto, desde a sua fundamentação conceptual até à sua implementação prática, passando pela análise detalhada dos dados empíricos recolhidos durante a fase piloto.

A estrutura do relatório reflete a natureza multidisciplinar do projeto, integrando contributos das ciências ambientais, da gestão turística, da engenharia de sistemas e da análise de dados. Esta abordagem holística é essencial para capturar a complexidade inerente à gestão sustentável de percursos naturais em contextos de elevada pressão turística.

1.9. Relevância para a Política Pública e Gestão Territorial

O SGIPA insere-se numa estratégia mais ampla de desenvolvimento sustentável da Região Autónoma da Madeira, alinhada com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável das Nações Unidas e com as diretrizes europeias para o turismo sustentável. O sistema constitui um instrumento de apoio à política pública regional, fornecendo dados objetivos e análises científicas que podem informar decisões estratégicas sobre o desenvolvimento turístico, a conservação da natureza e o ordenamento territorial.

A relevância do projeto transcende a dimensão puramente técnica, contribuindo para o reforço da capacidade institucional regional em áreas críticas como a gestão de recursos naturais, a inovação tecnológica e a investigação aplicada. O SGIPA representa, assim, um investimento estratégico no desenvolvimento de competências endógenas que podem ser aplicadas noutros domínios da gestão territorial e ambiental.

1.10. Perspetivas de Desenvolvimento Futuro

O presente relatório documenta a primeira fase de desenvolvimento e implementação do SGIPA, correspondente ao período de conceção, desenvolvimento tecnológico e teste piloto em percursos selecionados. As perspetivas de desenvolvimento futuro incluem a extensão do sistema à totalidade da rede de percursos classificados, a integração com outros sistemas de informação territorial e a incorporação de funcionalidades avançadas de inteligência artificial e *machine learning*.

O projeto SGIPA está concebido como uma plataforma evolutiva, capaz de incorporar continuamente novos desenvolvimentos tecnológicos e científicos. Esta característica é fundamental para assegurar a sua relevância e eficácia a longo prazo, num contexto de rápida evolução tanto das tecnologias digitais como dos padrões de comportamento turístico.

2. Diagnóstico Inicial e Linhas de Investigação

2.1. Metodologia do Diagnóstico Institucional

O desenvolvimento do Sistema de Gestão Integrado de Percursos e Atividades teve início com um diagnóstico institucional abrangente, conduzido através de uma metodologia mista que combinou análise documental, observação direta no terreno, entrevistas com *stakeholders*-chave e análise de dados operacionais existentes. Este processo de diagnóstico, realizado ao longo dos últimos anos, envolveu a Universidade da Madeira, o Instituto das Florestas e Conservação da Natureza e representantes da Secretaria Regional de Turismo, Ambiente e Cultura e da Proteção Civil.

A abordagem metodológica adotada baseou-se nos princípios da investigação-ação participativa, reconhecendo que a complexidade dos desafios associados à gestão de percursos naturais exige uma compreensão profunda não apenas dos aspetos técnicos e científicos, mas também das dinâmicas institucionais, das perceções dos utilizadores e das limitações operacionais existentes.

2.2. Identificação de Problemas Estruturais

O diagnóstico institucional realizado evidenciou problemas estruturais associados ao uso intensivo dos percursos naturais, nomeadamente:

Percursos com elevada notoriedade mediática - Percursos como a Vereda do Areeiro, a Levada das 25 Fontes e a Vereda da Ponta de São Lourenço têm registado níveis de utilização elevados. Esta carga não resulta apenas do aumento absoluto do número de visitantes, mas também da sua concentração em trilhos específicos, criando um desequilíbrio na distribuição da pressão turística.

Concentração horária da procura - A análise dos padrões de utilização revelou que a maioria dos visitantes tende a iniciar os percursos nas primeiras horas da manhã, criando picos de densidade que podem comprometer tanto a qualidade da experiência turística como a segurança operacional.

Limitações de infraestrutura energética e de conectividade - A localização remota de muitos percursos, combinada com a orografia complexa da ilha, cria desafios técnicos consideráveis para a instalação e manutenção de equipamentos de monitorização em tempo real.

Dificuldades de monitorização em tempo real - A ausência de sistemas automatizados de contagem de visitantes e de monitorização das condições ambientais

limita significativamente a capacidade de resposta das entidades gestoras face a situações de sobrecarga ou emergência.

Aumento de incidentes de segurança - A análise dos registos de ocorrências dos últimos cinco anos revelou uma tendência ascendente no número de acidentes, resgates e situações de emergência em diferentes percursos naturais da região.

Impactos negativos na perceção de experiência do visitante - Os resultados evidenciaram que os tempos de espera em pontos de interesse constituem fatores determinantes na avaliação negativa da experiência turística.

2.3. Definição das Linhas Estruturantes de Investigação

Assim e após esta análise, foram definidas quatro linhas estruturantes de investigação:

2.3.1. Capacidade de carga multidimensional

Integração das dimensões:

- **Sustentabilidade ambiental** - Avaliação dos impactos dos fluxos turísticos sobre os ecossistemas da Laurissilva e outros habitats sensíveis presentes na rede de percursos;
- **Segurança** - Desenvolvimento de modelos preditivos de risco que considerem fatores como as condições meteorológicas, o perfil dos visitantes, a densidade de utilização e as características específicas de cada percurso;
- **Experiência turística** - Compreensão dos fatores que determinam a satisfação dos visitantes e identificação de limiares de densidade além dos quais a qualidade da experiência se degrada significativamente.

2.3.2. Monitorização em tempo real

- **Contagem automática de visitantes** - Desenvolvimento de sistemas baseados em tecnologias de visão computacional e sensores inteligentes, capazes de operar de forma autónoma em condições ambientais adversas;

- **Sistemas de alerta operacional** - Processamento de informação em tempo real sobre densidade de visitantes, condições meteorológicas e outros fatores relevantes, gerando alertas automáticos quando determinados limiares são excedidos;
- **Sugestão de percursos alternativos** - Desenvolvimento de sistemas inteligentes capazes de redistribuir fluxos turísticos em tempo real, direcionando visitantes para percursos com menor pressão de utilização.

2.3.3. Desenvolvimento do produto turístico

- **Categorizar percursos** - Desenvolvimento de um sistema de classificação que considere múltiplos critérios, incluindo o grau de dificuldade, a sensibilidade ecológica, a capacidade de carga, o valor paisagístico e a adequação a diferentes perfis de visitantes;
- **Potenciar valorização económica** - Desenvolvimento de modelos sustentáveis de financiamento da conservação e gestão através de mecanismos como taxas de utilização, sistemas de reserva e desenvolvimento de produtos turísticos complementares;
- **Integrar tecnologias digitais de gestão** - Desenvolvimento de aplicações móveis, plataformas web e sistemas de informação que melhorem a experiência dos visitantes e apoiem a gestão operacional dos percursos.

2.3.4. Segurança e gestão de ocorrências

- **Identificação de perfis de risco** - Desenvolvimento de metodologias de avaliação que considerem tanto as características dos visitantes como as condições específicas de cada percurso;
- **Georreferenciação de incidentes** - Desenvolvimento de bases de dados geográficas, análise de *hotspots* de risco e identificação de fatores ambientais e operacionais associados à ocorrência de incidentes;
- **Apoio à proteção civil** - Desenvolvimento de sistemas de comunicação e coordenação que melhorem a eficácia das operações de resgate e emergência.

3. Evolução Conceptual: da Capacidade de Carga Clássica ao LAC Dinâmico

3.1. Fundamentos Históricos dos Modelos Clássicos

A conceptualização da capacidade de carga turística tem origem nos modelos da ecologia recreativa desenvolvidos nas décadas de 1960 e 1970, quando investigadores começaram a aplicar princípios da ecologia populacional à gestão do uso recreativo em áreas naturais. Trabalhos pioneiros como os de Wagar (1964) e Lime e Stankey (1971) estabeleceram as bases conceptuais para a definição de limites máximos de utilização compatíveis com a preservação dos recursos naturais.

Os modelos clássicos de capacidade de carga baseiam-se predominantemente na relação entre a área disponível e o número máximo de visitantes, assumindo condições relativamente homogéneas de uso e uma correlação linear entre densidade de visitantes e impacto ambiental. Esta abordagem parte do pressuposto de que existe um limiar quantitativo específico a partir do qual os impactos ambientais e sociais se tornam inaceitáveis, sendo esse limiar determinável através de cálculos baseados em variáveis físicas e operacionais (Wagar, 1964).

Contudo, a experiência acumulada em parques naturais e áreas protegidas demonstrou que os impactos turísticos não dependem apenas do número absoluto de visitantes, mas também de fatores como a distribuição temporal e espacial dos fluxos, o comportamento dos utilizadores, a sensibilidade ecológica dos habitats e a capacidade institucional de gestão (Shelby & Heberlein, 1986; Stankey et al., 1985).

A capacidade de carga turística (*Tourism Carrying Capacity* – TCC) tem vindo a afirmar-se como um dos conceitos centrais na gestão sustentável de destinos turísticos, particularmente em áreas naturais protegidas e em contextos territorialmente sensíveis. Tradicionalmente definida como o número máximo de visitantes que um determinado espaço pode suportar sem provocar alterações ambientais inaceitáveis ou comprometer a qualidade da experiência turística, a TCC evoluiu progressivamente para um quadro conceptual multidimensional e adaptativo, refletindo a crescente complexidade dos sistemas turísticos contemporâneos (Papageorgiou & Brotherton, 1999; Saveriades, 2000; Manning, 2007)

A formulação matemática tradicional da capacidade de carga física, expressa pela equação:

$$CC = \frac{A}{A_v} \times \frac{T}{T_v}$$

onde:

- CC = capacidade de carga
- A = área disponível
- A_v = área necessária por visitante
- T = tempo de funcionamento
- T_v = tempo de visita

Esta formulação ilustra o carácter determinístico e quantitativo dos modelos clássicos, que, apesar da sua simplicidade conceptual, revelaram limitações significativas quando aplicados a contextos turísticos complexos e dinâmicos (Cifuentes, 1992).

3.2. Limitações dos Modelos Tradicionais

Apesar do desenvolvimento conceptual significativo, a literatura identifica várias limitações na aplicação prática dos modelos clássicos de capacidade de carga. Entre os principais desafios destacam-se a dificuldade em estabelecer limites universais aplicáveis a diferentes contextos territoriais, a ausência de monitorização em tempo real e a fraca integração entre diferentes níveis institucionais de governação turística (Shelby & Heberlein, 1986; Stankey et al., 1985).

A experiência acumulada em parques naturais e áreas protegidas evidenciou que os modelos clássicos apresentam limitações estruturais que comprometem a sua eficácia como instrumentos de gestão:

- **Rigidez temporal** - Os modelos tendem a estabelecer limites fixos que não consideram a variabilidade sazonal, meteorológica ou comportamental;
- **Homogeneidade comportamental assumida** - Ignoram que diferentes grupos podem ter impactos distintos mesmo quando presentes em densidades similares;
- **Distribuição espacial uniforme** - Assumem que o impacto se distribui uniformemente pela área disponível, ignorando pontos de concentração natural.

3.3. Características da Realidade Contemporânea

Atualmente, a literatura reconhece quatro dimensões fundamentais na análise da TCC: física, ecológica, social e de gestão. A capacidade física está associada às limitações espaciais e infraestruturais de um determinado local, sendo frequentemente operacionalizada através do cálculo da área disponível por visitante ou da densidade máxima aceitável ao longo de percursos naturais (Cifuentes, 1992).

A capacidade ecológica relaciona-se com a resiliência dos ecossistemas face à pressão turística, variando significativamente em função das características biofísicas dos habitats e do nível de intervenção humana. Estudos realizados em parques naturais demonstram que diferentes zonas dentro de uma mesma área protegida podem apresentar limites de carga recreativa distintos, exigindo abordagens diferenciadas de gestão (Pickering & Hill, 2007).

A dimensão social da capacidade de carga introduz a perceção de sobrelotação e a qualidade da experiência turística como elementos centrais na definição de limites de utilização. Modelos como o Visitor Experience and Resource Protection (VERP) e o Limits of Acceptable Change (LAC) evidenciam que a gestão turística deve orientar-se não apenas para o controlo do número de visitantes, mas sobretudo para a manutenção de condições desejadas de uso recreativo e satisfação dos utilizadores (Stankey et al., 1985; Manning, 2007).

Em percursos inseridos em áreas classificadas, como a Laurissilva da Madeira, a definição de limites de utilização deve considerar não apenas a dimensão física, mas também a sensibilidade ecológica e os padrões reais de visitação (Mota et al., 2021).

Assim, em termos estruturais, a realidade contemporânea do turismo de natureza caracteriza-se por:

Pressão comportamental intensa e concentrada - Os visitantes contemporâneos tendem a concentrar-se em locais específicos que adquiriram notoriedade através das redes sociais, criando pressões pontuais que podem exceder largamente a capacidade de acomodação sustentável.

Estadas curtas e picos súbitos de procura - Ao contrário dos padrões tradicionais de turismo, caracterizados por estadas prolongadas e procura relativamente previsível, o turismo de natureza contemporâneo é frequentemente caracterizado por visitas de curta duração que se concentram em períodos específicos.

Influência das redes sociais - Fenómenos de viralização podem gerar aumentos súbitos e dramáticos da procura por locais específicos, criando pressões que excedem largamente as previsões baseadas em tendências históricas.

Variabilidade meteorológica relevante - As alterações climáticas têm aumentado a frequência e intensidade de eventos meteorológicos extremos, criando períodos de concentração da procura em dias com condições favoráveis.

Necessidade de experiência personalizada - Os turistas atuais procuram experiências únicas e personalizadas, o que cria pressões adicionais sobre recursos interpretativos e exige abordagens de gestão mais sofisticadas.

3.4. Integração de Tecnologias Digitais na Gestão Turística

A capacidade de gestão representa a dimensão institucional da TCC, refletindo a capacidade das entidades responsáveis para monitorizar fluxos turísticos, implementar medidas de mitigação e adaptar estratégias de gestão face a alterações na procura. Estudos recentes evidenciam a importância da utilização de sistemas integrados de indicadores e ferramentas analíticas para avaliar impactos turísticos em termos ambientais, económicos e sociais (Manning, 2007).

A revolução digital tem criado oportunidades para a gestão de destinos turísticos naturais, permitindo o desenvolvimento de sistemas mais sofisticados e responsivos. As tecnologias de informação e comunicação permitem agora a recolha e processamento de dados em tempo real sobre fluxos de visitantes, condições ambientais e qualidade da experiência turística. Esta capacidade de monitorização contínua abre possibilidades para modelos de gestão adaptativa que podem responder dinamicamente a alterações nas condições de utilização.

Os sistemas de posicionamento global (GPS) e as tecnologias móveis permitem o desenvolvimento de aplicações que podem orientar os visitantes em tempo real, sugerindo percursos alternativos quando determinados trilhos atingem níveis de saturação. Esta capacidade de redistribuição dinâmica de fluxos representa uma evolução fundamental relativamente aos modelos tradicionais de gestão, que se baseavam essencialmente em controlos estáticos de acesso.

A inteligência artificial e os algoritmos de *machine learning* oferecem possibilidades para o desenvolvimento de modelos preditivos que podem antecipar padrões de procura e identificar situações de risco antes que se materializem. Estes sistemas podem processar múltiplas variáveis simultaneamente, incluindo dados meteorológicos, padrões históricos de utilização, eventos especiais e tendências nas redes sociais, para gerar previsões mais precisas sobre a procura futura.

3.5. O Paradigma LAC no Contexto do SGIPA

O Sistema de Gestão Integrado de Percursos e Atividades assume o LAC como modelo dominante, integrando dados operacionais, fatores comportamentais, simulação dinâmica e leitura territorial especializada. Esta opção conceptual reflete o reconhecimento de que a gestão sustentável de percursos naturais exige abordagens flexíveis e adaptativas que possam responder à complexidade e variabilidade dos sistemas turísticos contemporâneos.

A implementação do paradigma LAC no SGIPA implica uma mudança fundamental na forma como a capacidade de carga é conceptualizada e operacionalizada. Em vez de procurar estabelecer limites fixos baseados em cálculos determinísticos, o sistema foca-se na definição de condições desejadas e na monitorização contínua de indicadores que permitam avaliar se essas condições estão a ser mantidas. Esta abordagem permite uma gestão mais refinada e reativa, capaz de acomodar a variabilidade inerente aos sistemas turísticos.

O modelo CCP (capacidade física) mantém-se como subconjunto técnico do sistema, fornecendo uma base quantitativa para a análise, mas é complementado por múltiplas outras dimensões de avaliação. Esta integração permite combinar o rigor quantitativo dos modelos tradicionais com a flexibilidade e adaptabilidade dos modelos contemporâneos de gestão.

3.6. Integração de Múltiplas Dimensões de Análise

A evolução conceptual representada pelo SGIPA implica a integração de múltiplas dimensões de análise que vão além da simples relação entre área e número de visitantes. A dimensão ecológica inclui a avaliação de impactos sobre a biodiversidade, a integridade dos habitats e a resiliência dos ecossistemas. Esta avaliação é particularmente crítica em contextos como a Laurissilva da Madeira, onde a sensibilidade ecológica exige abordagens de gestão especialmente cuidadosas.

A dimensão social incorpora a avaliação da qualidade da experiência dos visitantes, incluindo aspetos como a perceção de *crowding*, a satisfação com a experiência recreativa e a adequação das infraestruturas e serviços disponíveis. Esta dimensão reconhece que a sustentabilidade do turismo de natureza depende não apenas da proteção dos recursos naturais, mas também da manutenção de condições que proporcionem experiências de qualidade aos visitantes.

A dimensão económica considera os custos e benefícios associados a diferentes níveis de utilização, incluindo os custos de gestão e manutenção, os impactos económicos locais e a sustentabilidade financeira das operações de conservação. Esta dimensão é fundamental para assegurar que os modelos de gestão são não apenas ecológica e socialmente sustentáveis, mas também economicamente viáveis a longo prazo.

3.7. Simulação Dinâmica e Modelação Preditiva

A literatura recente aponta para uma transição clara de modelos estáticos para modelos dinâmicos de capacidade de carga, baseados em monitorização contínua, integração de indicadores multidimensionais e utilização de ferramentas analíticas avançadas. Estes modelos procuram responder aos desafios associados à crescente complexidade dos

sistemas turísticos contemporâneos, caracterizados por elevada mobilidade, digitalização da procura e maior exigência em termos de sustentabilidade ambiental e qualidade da experiência turística (Gössling et al., 2021; Manning, 2007).

A capacidade de simulação dinâmica representa uma das inovações mais significativas do SGIPA relativamente aos modelos tradicionais de capacidade de carga. Esta funcionalidade permite testar diferentes cenários de gestão e avaliar os seus potenciais impactos antes da implementação, reduzindo os riscos associados a decisões de gestão e permitindo uma otimização mais eficaz das estratégias de intervenção.

A modelação preditiva integrada no sistema permite antecipar padrões de procura e identificar situações potenciais de sobrecarga com antecedência suficiente para implementar medidas preventivas. Esta capacidade é particularmente valiosa em contextos caracterizados por elevada variabilidade da procura, permitindo uma gestão mais proativa e menos reativa.

A integração de dados em tempo real com modelos preditivos cria possibilidades para sistemas de gestão verdadeiramente adaptativos, capazes de ajustar continuamente as suas estratégias de intervenção com base na evolução das condições reais de utilização. Esta capacidade representa uma evolução fundamental relativamente aos modelos tradicionais, que se baseavam essencialmente em planos estáticos de gestão.

3.8. Conclusão

A análise dos fundamentos históricos dos modelos clássicos de capacidade de carga turística evidencia que estes desempenharam um papel determinante na introdução de uma lógica quantitativa na gestão do uso recreativo em áreas naturais. Baseados em pressupostos de homogeneidade espacial, estabilidade temporal e comportamento uniforme dos visitantes, estes modelos permitiram estabelecer referenciais iniciais para a definição de limites de utilização sustentável. No entanto, a evolução dos sistemas turísticos e a crescente complexidade das dinâmicas territoriais vieram expor limitações estruturais que reduzem a sua eficácia enquanto instrumentos exclusivos de planeamento e gestão.

A rigidez temporal associada à definição de limites fixos revela-se particularmente inadequada em contextos caracterizados por elevada variabilidade meteorológica e sazonal, enquanto a assunção de distribuição espacial uniforme ignora a existência de pontos de concentração natural que funcionam como elementos críticos da capacidade efetiva dos percursos. Acresce ainda que a crescente diversidade comportamental dos visitantes, bem como a influência das redes sociais na concentração súbita da procura, contribuem para padrões de utilização mais voláteis e difíceis de antecipar através de modelos determinísticos tradicionais.

Neste enquadramento, torna-se evidente a necessidade de evoluir para abordagens mais adaptativas e integradas, capazes de incorporar a variabilidade temporal, a heterogeneidade espacial e os fatores comportamentais que caracterizam o turismo de natureza contemporâneo. O paradigma dos Limits of Acceptable Change assume, assim, particular relevância ao privilegiar a monitorização contínua das condições de uso e a gestão baseada em evidência empírica. No contexto do SGIPA, esta transição traduz-se na integração do modelo de capacidade física como base técnica de referência, complementada por sistemas de simulação dinâmica, análise territorial especializada e dados operacionais em tempo real.

Desta forma, a gestão da capacidade de carga deixa de ser entendida como a definição de um limite fixo e passa a constituir um processo contínuo de ajustamento e decisão adaptativa, orientado para a salvaguarda dos ecossistemas, a segurança dos visitantes e a qualidade da experiência turística.

4. Fundamentação Conceptual

4.1. A Capacidade de Carga como Conceito Multidimensional

A avaliação da capacidade de carga em percursos pedestres naturais constitui um processo intrinsecamente multidimensional, integrando componentes ecológicas, sociais, operacionais e comportamentais. A literatura científica desenvolvida ao longo das últimas décadas demonstra que nenhum destes domínios, considerado isoladamente, é suficiente para sustentar modelos robustos de planeamento e gestão em áreas naturais protegidas. A evolução conceptual do tema conduziu à distinção entre diferentes níveis analíticos de capacidade de carga, nomeadamente a capacidade física, a capacidade real e a capacidade efetiva, permitindo uma abordagem progressivamente mais ajustada às condições territoriais e institucionais (Cifuentes, 1992).

A capacidade de carga física corresponde ao limite máximo teórico de utilização de um determinado espaço, geralmente determinado com base em métricas espaciais e temporais. A capacidade de carga real resulta da aplicação de fatores de correção associados a condicionantes ambientais, infraestruturais ou operacionais, enquanto a capacidade de carga efetiva incorpora a capacidade institucional de gestão, incluindo recursos humanos, sistemas de monitorização e instrumentos de controlo. Esta estrutura conceptual tem sido amplamente utilizada em estudos aplicados ao turismo em áreas protegidas devido à sua clareza metodológica e adaptabilidade a diferentes contextos territoriais.

4.2. A Dimensão Social da Experiência Turística

O contributo de Shelby e Heberlein (1986) representou um marco na evolução dos estudos sobre capacidade de carga ao introduzir a dimensão social e percetiva como variável central na avaliação da experiência recreativa. Estes autores demonstraram que a definição de limites de utilização não pode ser baseada exclusivamente no número absoluto de visitantes, devendo considerar a forma como a densidade é interpretada pelos utilizadores e como essa perceção influencia a satisfação e o significado atribuído à experiência.

A literatura subsequente reforçou a ideia de que o fenómeno de crowding não apresenta uma relação linear com a densidade física, podendo pequenas variações no número de encontros entre grupos gerar impactos significativos na qualidade percebida da visita. Em percursos de natureza contemplativa, caracterizados por motivações introspetivas ou espirituais, a necessidade de distanciamento entre visitantes tende a ser mais elevada, refletindo a importância da experiência individual e do contacto com o ambiente natural.

4.3. O Crowding como Variável Comportamental

Manning (2007) aprofundou esta perspetiva ao evidenciar que a perceção de crowding resulta da interação entre múltiplos fatores comportamentais e culturais. Para além da densidade física, a frequência e intensidade dos encontros entre grupos, as motivações da visita, as expectativas culturais e a sensibilidade individual ao contacto social em ambientes naturais desempenham um papel determinante na definição dos limites de uso aceitável. Esta abordagem contribuiu para a consolidação de modelos de gestão mais orientados para a qualidade da experiência do visitante, integrando indicadores sociais e psicológicos nos processos de tomada de decisão.

4.4. Estruturação dos Cálculos Físicos e Reais

O modelo proposto por Cifuentes (1992) continua a constituir uma referência metodológica relevante devido à sua aplicabilidade prática e à possibilidade de integrar variáveis locais na determinação da capacidade de carga. A distinção entre capacidade física, real e efetiva permite incorporar fatores ambientais, riscos operacionais e fragilidade ecológica na estimativa dos limites de utilização. A metodologia enfatiza a importância da recolha de dados no terreno, incluindo medições espaciais, observação do comportamento dos visitantes e análise das condições de acessibilidade e segurança, reforçando o carácter contextual das avaliações de capacidade de carga.

4.5. Integração das Dimensões de Conservação e Gestão

Nepal (2000) contribuiu para a expansão do conceito ao defender a necessidade de integrar simultaneamente objetivos de conservação ecológica e capacidade institucional de gestão nos modelos de capacidade de carga. Esta abordagem reconhece que os impactos do uso recreativo apresentam frequentemente um carácter cumulativo, sendo influenciados por padrões sazonais de procura, pela intensidade das atividades desenvolvidas e pela capacidade das entidades gestoras em assegurar manutenção, fiscalização e monitorização contínua. A inclusão de respostas adaptativas a variações climáticas e a mudanças nos fluxos turísticos torna-se, assim, um elemento essencial na gestão sustentável de áreas naturais.

4.6. A Variável Espaço por Utilizador

A revisão da literatura evidencia de forma consistente a inexistência de um valor universal de espaço por visitante aplicável a todos os contextos recreativos, refletindo a natureza multidimensional e dependente do contexto da capacidade de carga turística. Estudos empíricos e sínteses recentes demonstram que os requisitos espaciais variam significativamente em função da sensibilidade ecológica do território, das

características da experiência turística e da capacidade infraestrutural dos percursos (Manning, 2007; Nepal, 2000; Picazo-Córdoba et al., 2021; Rocha et al., 2021;).

Em ambientes urbanos ou recreativos intensivos, caracterizados por elevada acessibilidade e suporte infraestrutural robusto, valores entre 1 e 2 m^2 por visitante tendem a ser considerados aceitáveis, refletindo uma maior capacidade de absorção de fluxos e uma tolerância superior à densidade. Em contraste, percursos naturais de intensidade moderada requerem tipicamente intervalos entre 2 e 10 m^2, evidenciando a necessidade de equilibrar a fruição recreativa com a preservação ambiental e a qualidade da experiência do visitante. Em ecossistemas ecologicamente sensíveis ou de elevado valor paisagístico, os valores recomendados aumentam substancialmente, podendo situar-se entre 5 e 30 m^2 por utilizador, em função da vulnerabilidade dos habitats, da heterogeneidade espacial e da pressão cumulativa associada à utilização Bhutia & Guite, 2025; Quintal & Pavón, 2020;).

Tabela 1 — Padrões espaciais de capacidade de carga turística por contexto

Contexto	Espaço por visitante	Fatores determinantes	Abordagem metodológica
Ambientes urbanos	1–2 m^2	Infraestrutura, acessibilidade, perceção de crowding	Modelos multidimensionais, análise de densidade
Percursos naturais	2–10 m^2	Sensibilidade ecológica, experiência do visitante	Método de Cifuentes, LAC, indicadores biofísicos
Ecossistemas frágeis	15–30 m^2	Vulnerabilidade ambiental, qualidade do habitat	Modelos adaptativos, gestão multiescalar
Praias (zonadas)	Variável por zona	Satisfação do visitante, conservação	Modelos espaciais e zonamento
Parques de montanha	Capacidade diária (ex: 64–96 visitantes/dia)	Limites biofísicos, sazonalidade	Fatores de correção, LAC, participação

Para além da dimensão estritamente espacial, a literatura evidencia que estes valores devem ser interpretados à luz de fatores adicionais, nomeadamente a perceção de congestionamento por parte dos visitantes, a qualidade e distribuição das infraestruturas, bem como as características socioeconómicas e culturais dos contextos de utilização. Esta abordagem reforça a ideia de que a capacidade de carga não pode ser reduzida a um indicador físico único, devendo antes ser entendida como o resultado da interação entre múltiplas dimensões — ecológica, social e operacional — que

condicionam simultaneamente a sustentabilidade do território e a qualidade da experiência turística.

Neste contexto, observa-se uma evolução clara das abordagens metodológicas, passando de modelos estáticos e normativos para frameworks adaptativos e multidimensionais. Destaca-se, neste domínio, a integração do método de Cifuentes com o paradigma dos Limits of Acceptable Change (LAC), permitindo deslocar o foco de um limite fixo de visitantes para a definição de condições aceitáveis de utilização. Paralelamente, a incorporação de ferramentas de modelação espacial, sistemas de informação geográfica (SIG) e tecnologias de monitorização em tempo real tem permitido avançar para modelos mais dinâmicos, capazes de captar a variabilidade temporal e espacial da procura turística (Sejati et al., 2025; Viñals et al., 2024;).

Em síntese, a definição de parâmetros espaciais para a gestão da capacidade de carga deve ser entendida como um processo dinâmico, adaptativo e dependente do contexto, exigindo abordagens flexíveis que articulem evidência empírica, perceção dos visitantes e condições ambientais. Esta perspetiva constitui uma base fundamental para o desenvolvimento de modelos operacionais avançados, como o SGIPA, permitindo uma gestão mais eficiente, sustentável e orientada para a qualidade da experiência turística.

5. Modelo Operacional do SGIPA: da Capacidade Teórica à Monitorização em Tempo Real

O modelo operacional do SGIPA assenta na ideia de que a capacidade de carga de um percurso não pode ser tratada como um valor fixo e absoluto. Pelo contrário, deve ser entendida como um valor progressivamente refinado, que parte de uma base teórica assente nas características físicas do percurso e evolui, de forma contínua, para um valor ajustado à realidade observada no terreno. Esta evolução metodológica permite passar de uma estimativa estrutural inicial para uma capacidade monitorizada e adaptativa, permanentemente recalibrada em função do comportamento dos visitantes, dos fatores ambientais e das condições operacionais.

5.1. Modelo em cinco níveis

Neste enquadramento, o SGIPA propõe um modelo de cálculo e gestão estruturado em cinco níveis sucessivos. O primeiro corresponde à capacidade física base, definida a partir da geometria do percurso e da área disponível por visitante. O segundo traduz-se na capacidade física diária teórica, obtida mediante a introdução da variável temporal associada à rotação diária do percurso. O terceiro nível corresponde à capacidade corrigida, ajustada por fatores ambientais, de gestão e de uso. O quarto nível consiste na capacidade operacional temporalizada, obtida através da discretização temporal dos acessos por slots. Por fim, o quinto nível corresponde à capacidade monitorizada em tempo real, alimentada continuamente por dados observados, como entradas, saídas, tempos médios de permanência e ocupação estimada.

Esta progressão metodológica permite articular o cálculo teórico com a monitorização empírica, transformando a capacidade de carga de um conceito estático num instrumento operativo de apoio à decisão.

5.2. Caracterização Física do Percurso

O ponto de partida do modelo é a caracterização física de cada percurso. Para que o sistema possa calcular a capacidade de carga de forma consistente, é necessário definir um conjunto mínimo de variáveis estruturais relacionadas com a geometria, acessibilidade e funcionamento do espaço.

Tabela 2 — Variáveis estruturais mínimas para caracterização física do percurso

Variável	Descrição	Exemplo PR1
Comprimento total	Extensão completa do percurso	1200 metros
Comprimento acessível	Extensão efetivamente utilizável	1200 metros
Largura útil média	Largura média disponível para circulação	1 metro
Área útil disponível	Área total utilizável	1200 m^2
Área mínima por visitante	Espaço mínimo necessário por visitante	7 m^2
Sentido de circulação	Tipo de circulação permitida	Bidirecional
Horário de abertura	Período de funcionamento	08h00–17h00
Hora da última entrada	Limite para novas entradas	16h00
Duração média do percurso	Tempo médio de realização	70 minutos

5.3. Cálculo da Capacidade Simultânea Teórica

A primeira etapa do modelo consiste no cálculo da capacidade simultânea teórica, isto é, do número máximo de visitantes que podem encontrar-se, em simultâneo, no percurso, sem ultrapassar o critério mínimo de espaço útil por pessoa. Este cálculo é dado por:

$$CS = \frac{A_u}{A_v}$$

em que:

- CSrepresenta a capacidade simultânea;
- $A_u$representa a área útil do percurso;

- A_v representa a área mínima por visitante.

Aplicando esta fórmula ao caso do PR1:

$$CS = \frac{1200}{7} = 171{,}43 \approx 171 \text{ visitantes}$$

Este valor traduz o limite simultâneo admissível no percurso e funciona como restrição estrutural de segurança e conforto.

5.4. Rotação Diária Teórica

A segunda etapa consiste em calcular a rotação diária teórica, ou seja, o número de vezes que a capacidade simultânea do percurso pode ser renovada ao longo do período útil de funcionamento.

Este cálculo é dado por:

$$R_d = \frac{T_o}{T_p}$$

onde:

- R_d representa a rotação diária teórica;
- T_o corresponde ao tempo útil de operação do percurso, em minutos;
- T_p corresponde à duração média do percurso, também em minutos.

No caso do PR1, considerando um tempo útil de operação de 540 minutos e uma duração média de 70 minutos:

$$R_d = \frac{540}{70} = 7{,}71$$

Este valor significa que, em teoria, a capacidade simultânea do percurso poderia ser renovada cerca de 7,7 vezes por dia.

5.5. Capacidade Física Diária Teórica

A partir da capacidade simultânea e da rotação diária teórica obtém-se a capacidade física diária teórica, que representa o número total de visitantes que o percurso poderia acolher ao longo de um dia, caso a ocupação se distribuísse de forma perfeitamente equilibrada e sem perturbações operacionais.

$$CFD = CS \times R_d$$

Substituindo os valores do PR1:

$$CFD = 171 \times 7{,}71 = 1318{,}41 \approx 1322$$

Assim, o valor de referência registado no modelo-base do PR1 é de 1322 visitantes por dia.

5.6. Conversão para Capacidade Operacional Temporalizada

Apesar da sua utilidade, a capacidade física diária teórica permanece um valor idealizado, na medida em que assume uma renovação contínua e homogénea da ocupação. Na realidade, os visitantes não entram nem saem de forma perfeitamente distribuída ao longo do dia. É precisamente neste ponto que o SGIPA se distingue dos modelos clássicos, ao converter a capacidade teórica numa capacidade operacional temporalizada, baseada em slots de entrada e na sobreposição temporal da permanência dos visitantes.

A opção por slots de 30 minutos decorre da literatura sobre gestão temporal da carga, comportamento dos visitantes e modelos de fluxo pedonal, sendo esta granularidade considerada suficientemente sensível para captar picos de procura e, em simultâneo, suficientemente simples para ser operacionalizada em sistemas de reserva, monitorização e alerta.

A capacidade teórica é convertida numa capacidade operacional temporalizada, baseada em slots de entrada.

O número de slots de entrada por dia é calculado da seguinte forma:

$$N_s = \frac{T_e}{I_s}$$

onde:

- N_s representa o número de slots de entrada;
- T_e corresponde à janela de entradas permitidas, em minutos;
- I_s representa o intervalo temporal do slot.

No PR1, a janela de entrada decorre entre as 08h00 e as 16h00, ou seja, 480 minutos. Admitindo slots de 30 minutos:

$$N_s = \frac{480}{30} = 16$$

O sistema gera, assim, 16 slots de entrada por dia.

5.7. Sobreposição Temporal - Ocupação média por visitante

Tendo por base o PR1, e como cada visitante permanece no percurso 70 minutos em média, cada entrada ocupa mais do que um slot:

O número médio de slots ocupados por visitante é dado por:

$$O_s = \frac{T_p}{I_s}$$

No PR1:

$$O_s = \frac{70}{30} = 2{,}33$$

Isto significa que cada visitante ocupa, em média, a capacidade equivalente a 2,33 slots consecutivos.

5.8. Visitantes por Slot

Para garantir que o limite simultâneo do percurso nunca é ultrapassado, o número de visitantes admissível por slot tem de ser ajustado em função dessa ocupação média:

$$V_s = \frac{CS}{O_s}$$

No PR1:

$$V_s = \frac{171}{2{,}33} = 73{,}39 \approx 73$$

Deste modo, o sistema define 73 visitantes por slot de 30 minutos.

Resumindo e até ao presente data temos para o percurso PR1.

Campo	Valor
PR	1
Nome do Percurso	Vereda do Areeiro
Código	PR 1 MADEIRA
Ilha	Madeira
Estado	Parcialmente Aberto
Observações	Transitável desde o Pico do Areeiro até ao Miradouro da Pedra Rija (km 1,2)
Sentido (Way)	2
Comprimento Total (m)	6100
Comprimento Acessível (m)	1200
Largura (m)	1
Área útil (m²)	1200
Área mínima por visitante (m²)	7
Horário de Abertura	08:00
Última Entrada	16:00
Última Saída do percurso	17:10
Duração do Percurso (min)	70
Horas de Abertura (min)	540 (9 horas)
Fator de Correção	1
Capacidade Física Diária	1322 visitantes
Rotação (número de grupos/dia)	7,71
Capacidade Simultânea (Slot Capacity)	171 visitantes
Número Máximo de Slots (Rotação)	8,00
Pessoas por Slot (30m)	73,00
Total de Slots a Gerar (30m)	16,00

Figura 1 - Modelo de Dados Percurso – PR1

5.9. Capacidade Operacional Diária

A capacidade operacional diária resulta então da multiplicação entre o número de visitantes por slot e o número total de slots:

$$COD = V_s \times N_s$$

Logo, para o PR1:

$$COD = 73 \times 16 = 1168 \text{ visitantes/dia}$$

Este valor traduz uma capacidade operacional mais realista do que a capacidade física teórica, porque incorpora a forma efetiva como os acessos se distribuem no tempo.

5.10. Availability Person Error Factor (APE)

A diferença entre a capacidade física diária teórica e a capacidade operacional diária representa o desvio gerado pela discretização temporal, pela permanência média dos visitantes e pela necessidade de evitar sobreposição excessiva. Este desvio é modelado no SGIPA através do indicador APE, concebido como métrica de calibração entre o potencial físico do percurso e a sua capacidade real de operação segura.

5.10.1. Cálculo do APE

Em valor absoluto, o APE é expresso por:

$$APE_a = CFD - COD$$

No PR1:

$$APE_a = 1322 - 1168 = 154$$

Em valor relativo:

$$APE_r = \frac{CFD - COD}{CFD}$$

Logo:

$$APE_r = \frac{154}{1322} = 0{,}1165 \approx 11{,}65\%$$

O APE mede, assim, a perda de disponibilidade operacional face ao máximo teórico. Quanto maior for este valor, maior será a incompatibilidade entre a duração média da visita, o intervalo temporal dos slots e o limite simultâneo do percurso.

5.10.2. Função do APE como indicador de calibração

No SGIPA, o APE não é tratado como simples perda matemática, mas sim como indicador crítico de calibração. Através dele, é possível testar cenários alternativos de gestão, designadamente a alteração da área mínima por visitante, a modificação da duração do slot, o alargamento do horário de funcionamento ou a reconfiguração do sistema de entrada.

5.10.3. Aplicação de Fatores de Correção

A evolução dos modelos de capacidade de carga turística tem evidenciado a necessidade de ultrapassar abordagens estritamente geométricas e determinísticas, centradas apenas na relação entre espaço disponível e número máximo de visitantes. Em contextos territoriais complexos, como os percursos pedestres em áreas naturais protegidas, a capacidade efetiva de utilização resulta da interação entre múltiplos fatores ambientais, operacionais, infraestruturais, comportamentais e de gestão. A incorporação destes elementos exige metodologias capazes de refletir a variabilidade temporal e espacial das condições de uso, bem como a diversidade de perfis e padrões de comportamento dos visitantes.

Nos modelos clássicos, como o proposto por Cifuentes (1992), a capacidade de carga real é obtida através da multiplicação sucessiva de fatores de correção que ajustam a capacidade física inicial. Embora esta abordagem tenha permitido introduzir maior realismo nos cálculos, a sua aplicação em sistemas altamente dinâmicos tende a produzir efeitos cumulativos desproporcionais, reduzindo excessivamente os valores estimados ou, inversamente, dificultando a identificação de situações críticas localizadas.

Além disso, a multiplicação simples pressupõe implicitamente que todos os fatores possuem igual relevância, não considerando diferenças territoriais nem a possibilidade de adaptação temporal em função de condições meteorológicas, operacionais ou comportamentais.

No âmbito do SGIPA, é proposta uma abordagem de ponderação adaptativa que permite calibrar o impacto relativo de cada fator de correção em função das características

específicas de cada percurso. Esta metodologia parte do reconhecimento de que a capacidade de carga constitui um fenómeno sistémico e dinâmico, influenciado por interdependências complexas entre variáveis biofísicas, infraestruturais e sociais. Assim, em vez de uma simples multiplicação uniforme, os fatores passam a ser integrados num modelo de ponderação que atribui diferentes pesos relativos conforme o contexto territorial, a tipologia de uso turístico, a sensibilidade ecológica e a capacidade operacional de gestão.

Fatores Ambientais

Os fatores ambientais representam condicionantes diretas da segurança, da integridade ecológica e da qualidade da experiência turística. A precipitação, por exemplo, influencia simultaneamente o risco de escorregamento, a erosão do solo e a estabilidade de taludes, podendo também prolongar o tempo de permanência dos visitantes devido à necessidade de deslocação mais cautelosa. Em percursos de levadas ou trilhos florestais húmidos, esta variável assume particular relevância, exigindo ajustamentos operacionais que podem incluir redução temporária da capacidade ou redefinição de horários de visitação.

De forma semelhante, o vento forte afeta especialmente percursos expostos ou de crista, interferindo na perceção de segurança e conforto dos visitantes. A exposição solar e o stress térmico constituem igualmente fatores críticos, sobretudo em percursos com reduzida cobertura vegetal, onde o aumento da fadiga física pode levar a maior necessidade de pausas e, consequentemente, a uma menor taxa de renovação espacial. A fragilidade ambiental, associada à presença de habitats sensíveis, espécies endémicas ou solos vulneráveis, assume um papel central na lógica dos Limits of Acceptable Change, uma vez que define limiares qualitativos de impacto que não podem ser ultrapassados sem comprometer a integridade ecológica. Por fim, o risco hidrológico, incluindo zonas alagadas ou suscetíveis a cheias repentinas, introduz níveis adicionais de incerteza operacional, particularmente em áreas montanhosas ou húmidas.

Fatores Operacionais

Os fatores operacionais refletem condições diretamente relacionadas com a gestão do uso turístico. Encerramentos temporários motivados por manutenção, eventos excecionais ou proteção de habitats reduzem a disponibilidade efetiva do percurso e alteram a distribuição temporal da procura. A acessibilidade reduzida, resultante de troços estreitos, degraus elevados ou secções técnicas, diminui a fluidez do fluxo de visitantes e aumenta o tempo médio de permanência no sistema, influenciando a capacidade simultânea de utilização.

O tempo útil diário, determinado pelas horas de luz, pelas condições meteorológicas e pelas regras de visitação estabelecidas pelas entidades gestoras, constitui outro elemento determinante, uma vez que condiciona o número máximo de rotações possíveis ao longo do dia. Este fator assume particular importância em destinos insulares sujeitos a variações rápidas das condições climáticas.

Fatores Infraestruturais

A qualidade e o estado de conservação das infraestruturas influenciam diretamente a capacidade operacional dos percursos. A erosão do trilho pode reduzir a largura útil de circulação e aumentar o risco de acidentes, obrigando frequentemente à progressão em fila e diminuindo a capacidade simultânea. Zonas alagadas ou instáveis podem induzir desvios informais que intensificam a compactação do solo e ampliam os impactos ambientais, além de reduzir a velocidade média de deslocação.

O estado de conservação de passadiços, corrimões, sinalética e zonas de descanso constitui igualmente uma variável crítica, uma vez que infraestruturas bem mantidas contribuem para a distribuição equilibrada dos fluxos e para a redução do tempo de permanência em pontos específicos.

Fatores de Gestão

Os fatores de gestão refletem a capacidade institucional de monitorizar e regular a utilização dos percursos. O conflito de fluxos, resultante do cruzamento de sentidos de circulação, da coexistência com outras atividades recreativas ou da presença de grupos organizados, pode gerar congestionamentos localizados e reduzir a qualidade da experiência turística. A capacidade de gestão, traduzida no número de vigilantes, na disponibilidade de sistemas tecnológicos de monitorização e na rapidez de resposta operacional, constitui um elemento determinante na transição da capacidade física teórica para a capacidade efetiva de utilização.

O risco geológico, associado a quedas de pedras ou instabilidade de taludes, introduz igualmente condicionantes relevantes, podendo originar restrições temporárias ou permanentes que alteram significativamente a capacidade disponível.

Fator Comportamental

Entre todos os fatores considerados, o tempo médio de permanência assume particular relevância na modelação dinâmica da capacidade de carga. Este parâmetro resulta da interação entre motivações turísticas, práticas contemplativas, fotografia, descanso e perceção de densidade social. A sua variabilidade influencia diretamente a taxa de

renovação espacial do percurso e a probabilidade de ocorrência de acumulações em Pontos de Interesse. A integração desta variável no modelo SGIPA permite compreender a capacidade de carga não apenas como um limite físico, mas como um processo dinâmico dependente do comportamento dos utilizadores.

Em síntese, o modelo de ponderação adaptativa proposto no SGIPA representa uma evolução conceptual e metodológica face às abordagens tradicionais, ao permitir integrar múltiplas dimensões de análise num quadro flexível e territorialmente contextualizado. Esta abordagem reforça a capacidade de antecipar situações críticas, ajustar parâmetros de gestão em tempo real e promover uma utilização sustentável dos percursos naturais, alinhando-se com os princípios contemporâneos de governança adaptativa em turismo de natureza (Manning, 2007; Nepal, 2000).A capacidade operacional é transformada numa capacidade corrigida, incorporando fatores ambientais e de gestão.

Tabela 3-Fatores de Correção Integrados no Modelo SGIPA

Cód	Fator de Correção	Descrição Científica	Formulação Matemática	Numerador / Denominador
FC1	Dias de Chuva	Redução da segurança, aumento tempo permanência, degradação do solo.	1 - (Dias Chuvosos / Total Dias)	Dias Chuvosos / Total Dias
FC2	Dias de Vento Forte	Diminuição do conforto e aumento do risco em zonas expostas.	1 - (Dias Ventosos / Total Dias)	Dias Ventosos / Total Dias
FC3	Encerramentos Temporários	Indisponibilidade total ou parcial do percurso.	1 - (Dias Encerramento / Total Dias)	Dias Encerramento / Total Dias
FC4	Acessibilidade Reduzida	Segmentos técnicos reduzem a fluidez do fluxo.	1 - (Segmentos Difíceis / Total Segmentos)	Segmentos Difíceis / Total Segmentos
FC5	Risco de Erosão	Presença de solos vulneráveis.	1 - (Segmentos Erodíveis / Total Segmentos)	Segmentos Erodíveis / Total Segmentos
FC6	Zonas Alagadas	Segmentos com acumulação de água.	1 - (Segmentos Alagados / Total Segmentos)	Segmentos Alagados / Total Segmentos
FC7	Exposição Solar	Segmentos sem sombra aumentam stress térmico.	1 - (Segmentos sem Sombra / Total Segmentos)	Segmentos sem Sombra / Total Segmentos
FC8	Fragilidade Ambiental	Presença de habitats sensíveis.	1 - (Áreas Sensíveis / Total Áreas)	Áreas Sensíveis / Total Áreas
FC9	Tempo de Uso Diário	Horas efetivas disponíveis.	Horas Efetivas / Horas Ideais	Horas Efetivas / Horas Ideais
FC10	Infraestruturas e Serviços	Adequação das infraestruturas.	Infraestrutura Existente / Infraestrutura Recomendada	Existente / Recomendada
FC11	Conflito de Fluxos	Cruzamentos e congestionamentos.	1 - (Percentagem Conflito / 100)	Percentagem Conflito / 100
FC12	Capacidade de Gestão	Recursos humanos e tecnológicos.	Pessoal Disponível / Pessoal Necessário	Disponível / Necessário
FC13	Estado de Conservação	Grau de degradação do percurso.	1 - (Segmentos Degradados / Total Segmentos)	Degradados / Total
FC14	Tempo Médio de Permanência	Diferença entre tempo ideal e observado.	Tempo Ideal / Tempo Observado	Ideal / Observado
FC15	Risco de Queda de Pedras	Zonas com instabilidade geológica.	1 - (Zonas Queda Pedras / Total Zonas)	Queda Pedras / Total

5.10.4. Fórmula de ponderação adaptativa

O modelo SGIPA implementa uma abordagem inovadora de ponderação que supera as limitações dos métodos tradicionais de multiplicação sequencial de factores. Esta metodologia permite uma calibração mais precisa e contextualizada dos impactos, adaptando-se às características específicas de cada percurso. A formulação proposta oferece maior flexibilidade na atribuição de pesos relativos, reconhecendo que diferentes factores ambientais e operacionais possuem relevâncias distintas consoante o tipo de percurso e as condições locais. Esta abordagem garante uma avaliação mais realista e representativa das condições efectivas de operação.

Em vez de:

$$CCE = CFD \times FC_1 \times FC_2 \times \cdots \times FC_n$$

o SGIPA propõe:

$$FC_g = 1 - \sum_{i=1}^{n} (w_i \times F_i)$$

onde:

- FC_g representa o fator global de correção;
- F_i representa o valor percentual do fator de correção i;
- w_i representa o peso do fator i, com $\sum w_i = 1$.

A capacidade corrigida efetiva é então dada por:

$$CCE = COD \times FC_g$$

Esta formulação permite, por exemplo, que a chuva tenha maior peso em percursos de levada com piso escorregadio, que o vento pese mais em percursos de crista e que a fragilidade ambiental penalize mais intensamente zonas ecologicamente sensíveis.

5.10.5. Monitorização Empírica

O modelo SGIPA introduz depois uma camada de monitorização empírica, na qual o cálculo teórico passa a ser confrontado com dados reais provenientes de câmaras, sensores, contadores automáticos, sistemas de reservas e validações de entrada.

O sistema recolhe dados de:

- Entradas
- Saídas
- Ocupação estimada em tempo real
- Tempo médio efetivo de permanência

A ocupação em cada instante:

$$O_t = O_{t-1} + E_t - S_t$$

onde:

- $O_t$representa a ocupação estimada no instante t;
- $E_t$corresponde às entradas registadas no intervalo t;
- $S_t$corresponde às saídas registadas no mesmo intervalo.

Esta leitura permite verificar se a ocupação observada se mantém abaixo da capacidade simultânea. Sempre que a ocupação ultrapassa ou se aproxima de limiares críticos, o sistema pode ativar alertas operacionais e semáforos de risco, confirmando a importância da leitura intradiária e não apenas da análise de totais diários.

5.10.6. Recálculo do tempo médio de permanência

O tempo médio efetivo de permanência é recalculado continuamente a partir dos dados observados:

$$T_{p(obs)} = \frac{\sum_{j=1}^{m} t_j}{m}$$

onde:

- $t_j$representa o tempo individual de permanência do utilizador j;
- $m$representa o número de observações válidas.

Este valor substitui o tempo médio teórico sempre que existam dados robustos, permitindo recalcular automaticamente a ocupação média por visitante, os visitantes por slot e a capacidade operacional do percurso. O modelo torna-se, assim, progressivamente aprendente e adaptativo.

5.10.7. Verificação de Conformidade

Outra componente central do SGIPA corresponde à verificação da conformidade entre a capacidade reservada e a capacidade efetivamente usada. Para esse efeito, o sistema integra reservas por slot e entradas reais observadas, identificando a existência ou não de prevaricação.

A taxa de prevaricação é calculada como:

$$TP = \frac{E_r - R_v}{E_r} \times 100$$

onde:

- TPrepresenta a taxa de prevaricação;
- $E_r$corresponde às entradas reais;
- $R_v$corresponde às reservas válidas para o mesmo intervalo temporal.

Quando:

$TP > 0$, existem mais entradas do que reservas, o que indica entradas não autorizadas;

$TP < 0$, existem menos entradas do que reservas, evidenciando ausências;

$TP = 0$, verifica-se conformidade total.

6. Baías Recreativas e Pontos de Interesse (POI) na Modelação Matemática da Capacidade de Carga em Percursos Naturais

A evolução metodológica do SGIPA conduziu à necessidade de identificar unidades espaciais diferenciadas ao longo dos percursos, capazes de explicar a formação de concentrações temporárias de visitantes. A análise empírica realizada em percursos como o Caldeirão Verde, o Fanal e outros espaços com elevada atratividade paisagística demonstrou que o comportamento dos visitantes não segue uma lógica linear contínua. Pelo contrário, a experiência é frequentemente marcada por interrupções associadas à contemplação da paisagem, fotografia, descanso ou interpretação ambiental.

6.1. Conceito Operacional de Ponto de Interesse (POI)

Foi introduzido o conceito operacional de Ponto de Interesse (POI), entendido como um local específico do percurso onde a probabilidade de permanência dos visitantes é significativamente superior à média do restante trajeto. Estes pontos correspondem frequentemente a:

- Miradouros naturais
- Clareiras emblemáticas
- Cascatas
- Formações geomorfológicas singulares
- Enquadramentos paisagísticos de elevado valor simbólico

6.2. Formulação Matemática dos POI

Para operacionalizar esta realidade no modelo matemático, o SGIPA passou a tratar os POI como baías recreativas, ou seja, unidades espaciais delimitadas cuja capacidade de carga deve ser calculada autonomamente em relação ao restante percurso. Esta lógica aproxima-se das abordagens da literatura de gestão recreativa que reconhecem os *hotspots* de utilização intensiva como elementos determinantes na definição dos limites de uso aceitável.

A capacidade física simultânea de cada POI é determinada por:

$$C_{POI} = \frac{A_{util}}{E_{visitante}}$$

onde:

- C_{POI} = capacidade simultânea do ponto de interesse
- A_{util} = área efetivamente disponível para utilização recreativa

- $E_{visitante}$ = espaço médio necessário por visitante

A aplicação desta equação evidenciou que a capacidade global do sistema é frequentemente condicionada pela dimensão reduzida dos POI. Em percursos como o Caldeirão Verde, por exemplo, a área disponível junto à cascata funciona como verdadeiro elemento limitante da capacidade do percurso.

6.3. Integração da Dimensão Temporal

A permanência prolongada dos visitantes nos POI reduz a taxa de renovação espacial. Para integrar esta dimensão temporal:

$$R_{POI} = \frac{T_{operacional}}{T_{permanencia}}$$

Assim, a capacidade diária teórica do ponto de interesse:

$$CD_{POI} = C_{POI} \times R_{POI}$$

Esta formulação demonstra que POI com permanências médias elevadas apresentam capacidades diárias efetivas muito inferiores às estimadas apenas com base na área.

6.3.1. Determinação do Elemento Restritivo

A capacidade de carga global do percurso é condicionada pelo elemento espacial mais restritivo:

$$CC_G = \min(C_L, C_{POI1}, C_{POI2}, \ldots, C_{POIn})$$

onde C_L representa a capacidade linear do percurso.

6.3.2. Implicações para a Gestão

O SGIPA passou, deste modo, a conceptualizar o percurso como um sistema composto por segmentos de circulação e por POI estruturantes, sendo a capacidade global determinada pelo ponto mais restritivo do sistema. A sustentabilidade da experiência turística depende, por isso, da gestão integrada do espaço e do tempo, da monitorização contínua dos padrões de utilização e da identificação do verdadeiro elemento limitante do percurso.

Esta conceptualização permite compreender que POI com permanências médias elevadas apresentam capacidades diárias efetivas significativamente inferiores às

estimadas apenas com base na área. Em locais como o planalto do Fanal, onde a contemplação da paisagem induz tempos de permanência superiores, a rotação espacial reduz-se substancialmente, aumentando o risco de saturação.

6.4. Conclusão

Assim, podemos concluir que a avaliação da capacidade de carga em percursos naturais é, por natureza, multidimensional. Integra componentes ecológicas, sociais, operacionais e comportamentais, e exige uma leitura articulada entre diferentes domínios analíticos.

Tabela 4 — Níveis conceptuais da capacidade de carga

Nível	Descrição	Características
Capacidade de carga física	Limite máximo teórico	Baseado em métricas espaciais, temporais e operacionais
Capacidade de carga real	Valor ajustado	Aplicação de fatores de correção ambientais, físicos e infraestruturais
Capacidade de carga efetiva	Valor operacional	Integra condições de gestão, recursos humanos, sistemas de controlo e monitorização

A revisão conceptual integrada no SGIPA reconhece os contributos centrais de Shelby e Heberlein, ao salientarem a importância da perceção dos visitantes, de Manning, ao aprofundar a dimensão comportamental do crowding, de Cifuentes, ao sistematizar a lógica entre capacidade física, real e efetiva, e de Nepal, ao articular conservação ecológica com capacidade institucional de gestão. O modelo assume, assim, que não existem valores universais aplicáveis a todos os percursos e que cada realidade territorial exige calibração específica.

7. Gestão Temporal da Capacidade – Justificação Científica dos Slots

A gestão da capacidade não é apenas espacial, mas também temporal. A literatura internacional evidencia que a distribuição dos visitantes ao longo do tempo é essencial para:

- Evitar congestionamentos locais
- Manter níveis aceitáveis de experiência recreativa
- Reduzir pressão ecológica

7.1. Fundamentação dos Slots de 30 Minutos

A adoção de slots de 30 minutos fundamenta-se em:

- Compatibilidade com tempo médio de permanência (20-40 min)
- Granularidade adequada para previsão e simulação
- Controlo operacional eficiente
- Redução de chegadas em massa ("pulse loading")

Esta lógica permite modelar comportamentos de fluxo pedonal e integrar algoritmos preditivos baseados em dados de sensores.

7.2. Base conceptual: gestão da capacidade de carga temporal

A literatura sobre carrying capacity e visitor flow management (Cifuentes, 1992; Manning, 2007; Shelby & Heberlein, 1986) reconhece que a gestão da capacidade de carga não deve ser apenas espacial (m^2 por visitante), mas também temporal — isto é, deve garantir que os visitantes são distribuídos ao longo do tempo, evitando concentrações súbitas que afetem a experiência recreativa, a segurança e a pressão ecológica.

Os intervalos de 30 minutos são internacionalmente utilizados (ex. National Park Service, USA; Costa Rica National Trails Program) como unidade mínima eficiente de controlo operacional que permite recolher e reagir a dados em tempo quase real, distribuir fluxos de visitantes sem criar longas esperas e facilitar reservas online com janelas previsíveis e práticas.

7.3. Justificação temporal e comportamental

Estudos de comportamento de visita (Ceballos-Lascuráin, 1996; Newsome et al., 2013) indicam que o tempo médio de permanência em miradouros ou pontos de interesse situa-se entre 20 e 40 minutos em percursos curtos ou médios. Logo, um slot de 30 minutos é representativo do ritmo natural de visita e pausa, permitindo modelar a permanência e deslocação média de grupos ao longo do percurso e garantir uma resolução temporal adequada para o cálculo do APE Factor .

1) Teoria de chegadas no tempo (fila/chegadas em blocos)

- Teoria das Filas: modelos M(t)/G/1 (taxa de chegada dependente do tempo) e chegadas em lotes ("bulk arrivals") explicam pulsos de procura quando muitos entram no mesmo instante (ex.: início do *slot*). Resultado: picos de carga instantânea e tempos de permanência efetivos mais longos na infraestrutura.

- Implicação: a suposição "uniforme no slot" (chegadas homogéneas) é otimista; com pulso de chegada, a ocupação simultânea e o risco de congestionamento aumentam.

2) Fluxo pedonal e "pulse loading"

- Em engenharia de tráfego pedonal (fundamental diagram), taxa de chegada elevada num curto intervalo conduz a densidades locais acima do conforto, mesmo que o total diário esteja "dentro da capacidade".

- Implicação: um slot de 30 min pode ser válido para planeamento, mas precisa de penalização de eficiência se as chegadas forem concentradas (pico no minuto 0).

3) LAC/VERP e capacidade recreativa

- Quadros como LAC (Limits of Acceptable Change) e VERP reconhecem que condições de uso (ex.: aglomeração pontual) degradam a experiência/segurança independentemente do total diário.

- Implicação: métricas devem capturar distribuição intrasslot (não só totais/slot).

7.4. Relação com o modelo de predição e simulação

A granularidade de 30 minutos permite aplicar algoritmos de previsão de entrada e saída baseados em dados de sensores e check-ins, detetar variações abruptas de procura (spikes) em curtos intervalos e ajustar automaticamente fatores de correção meteorológicos e de segurança em função da hora.

Síntese justificativa

Critério	Racional Científico	Benefício Operacional
Gestão temporal da carga	Adaptação a modelos de fluxo e experiência	Evita sobrelotação e garante segurança
Comportamento do visitante	Tempo médio de paragem ≈ 20–40 min	Aumenta realismo e eficiência na rotação
Compatibilidade com o modelo	540 min / 30 = 18 slots possíveis	Facilita cálculo e reserva digital
Simulação e previsão	Granularidade ótima para IA	Permite análises preditivas e alertas dinâmicos

8. Análise Estatística dos Padrões de Utilização: Estudo Comparativo de Percursos Monitorizados

8.1. Metodologia

A presente análise estatística incidiu sobre quatro percursos pedestres monitorizados por contagem física, designadamente o PR1 — Vereda do Areeiro, o PR8 — Vereda da Ponta de São Lourenço, o PR9 — Levada do Caldeirão Verde e o PR11 — Vereda dos Balcões.

A informação utilizada resultou de observação direta efetuada nos percursos ao longo de vários dias, organizada em registos horários de entradas.

Neste sentido, a análise assenta numa observação semanal do comportamento de utilização em cada percurso, permitindo caracterizar padrões de procura e ritmos de visitação ao longo dos dias observados

.

8.2. Critérios de consistência metodológica

Para garantir consistência metodológica, todos os percursos foram analisados exclusivamente com base nas entradas registadas. Esta opção metodológica assegura comparabilidade entre os quatro casos estudados, elimina distorções associadas à inclusão de variáveis não homogéneas e permite trabalhar com uma métrica única e comparável, adequada à leitura científica dos padrões de utilização.

8.3. Harmonização dos dados

Os dados originais foram previamente harmonizados e integrados numa base consolidada, contendo, para cada registo, a identificação do percurso, a data da observação, o intervalo horário correspondente e o número de entradas registadas.

Tabela 5 — Estrutura da base de dados harmonizada

Campo	Descrição
Identificação do percurso	Código do percurso (PR1, PR8, PR9, PR11)
Data da observação	Data específica do registo
Intervalo horário	Período temporal da contagem
Número de entradas	Quantidade de visitantes registados

8.4. Caracterização da amostra

A amostra em estudo corresponde a quatro percursos acompanhados por contagem física ao longo de vários dias de observação, permitindo uma leitura comparativa do comportamento semanal de utilização.

Volume absoluto de entradas

A análise do volume de entradas evidencia diferenças claras de intensidade de utilização entre os percursos observados.

Tabela 6— Volume total de entradas por percurso

Percurso	Total de entradas	Posição
PR8 — Vereda da Ponta de São Lourenço	8.754	1.º
PR1 — Vereda do Areeiro	6.403	2.º
PR9 — Levada do Caldeirão Verde	6.018	3.º
PR11 — Vereda dos Balcões	4.262	4.º

Estes valores evidenciam diferenças claras de intensidade de utilização entre percursos, sugerindo diferentes níveis de atratividade, pressão de uso e procura efetiva.

Médias diárias de entradas

A leitura das médias diárias confirma a diferenciação observada no volume acumulado de entradas.

Tabela 7—Média diária de entradas por percurso

Percurso	Média diária	Intensidade
PR8 — Vereda da Ponta de São Lourenço	1.250,6 entradas/dia	Muito alta
PR1 — Vereda do Areeiro	914,7 entradas/dia	Alta
PR9 — Levada do Caldeirão Verde	859,7 entradas/dia	Alta
PR11 — Vereda dos Balcões	608,9 entradas/dia	Moderada

O PR8 destacou-se não apenas pelo maior volume acumulado, mas também pela maior intensidade média diária de utilização. O PR1 e o PR9 surgem em níveis relativamente próximos, embora o PR1 apresente um valor médio superior. O PR11, por sua vez, evidencia um padrão de utilização globalmente mais moderado.

8.5. Análise comparativa dos percursos

A comparação estatística entre os quatro percursos evidencia que a utilização observada não se distribui de forma uniforme, quer entre percursos, quer entre dias. Pelo contrário, verifica-se a existência de diferenças significativas na intensidade de entradas, o que sugere comportamentos de procura distintos e dinâmicas específicas de utilização.

Perfil do PR8 — Vereda da Ponta de São Lourenço

O PR8 assume-se como o percurso de maior utilização no conjunto estudado. Apresenta o maior volume total de entradas e a média diária mais elevada, o que confirma a sua forte capacidade de atração e a intensidade da procura observada. Simultaneamente, evidencia maior amplitude nas entradas entre dias, sugerindo uma flutuação mais acentuada da procura ao longo do período analisado.

Perfil do PR1 — Vereda do Areeiro

O PR1 surge como o segundo percurso com maior volume de entradas. Os resultados confirmam um nível de procura elevado, embora inferior ao registado no PR8. A

variabilidade observada entre dias pode ser caracterizada como intermédia, situando-se num patamar de utilização intenso, mas com menor oscilação do que a observada no percurso líder.

Perfil do PR9 — Levada do Caldeirão Verde

O PR9 apresenta um volume total de entradas próximo do PR1, mas distingue-se por um comportamento mais estável, com menores oscilações entre os dias observados. A intensidade média diária é ligeiramente inferior à do PR1, mas o padrão global sugere uma utilização mais regular e menos volátil.

Perfil do PR11 — Vereda dos Balcões

O PR11 evidencia o padrão mais moderado entre os quatro casos analisados. Apresenta os valores mais baixos em termos absolutos, mas mantém um comportamento identificável e consistente. Apesar da menor intensidade global, observa-se ainda flutuação em determinados dias, o que demonstra que este percurso não deve ser interpretado como residual, mas sim como um caso de utilização menos intensa no contexto da amostra.

8.6. Padrões horários de utilização

A análise horária constitui uma das dimensões mais relevantes do estudo, uma vez que permite identificar os momentos de maior pressão de uso ao longo do dia. Em todos os percursos observados, verifica-se uma concentração clara das entradas no período da manhã, o que evidencia um padrão temporal consistente e transversal.

Concentração matinal transversal

Em termos globais, o principal pico de entradas situa-se entre as 09h00 e as 11h00. Este resultado demonstra uma procura preferencial pelos períodos matinais, configurando um padrão comum aos quatro percursos analisados. Tal comportamento sugere que a utilização não se distribui de forma uniforme ao longo do dia, concentrando-se em janelas horárias específicas que tendem a aumentar a pressão sobre os percursos e sobre os respetivos pontos críticos de ocupação.

Fatores explicativos da concentração matinal

Este comportamento poderá estar associado a um conjunto de fatores de natureza operacional, ambiental e comportamental, sintetizados na tabela seguinte.

Tabela 8 — Fatores explicativos da concentração matinal

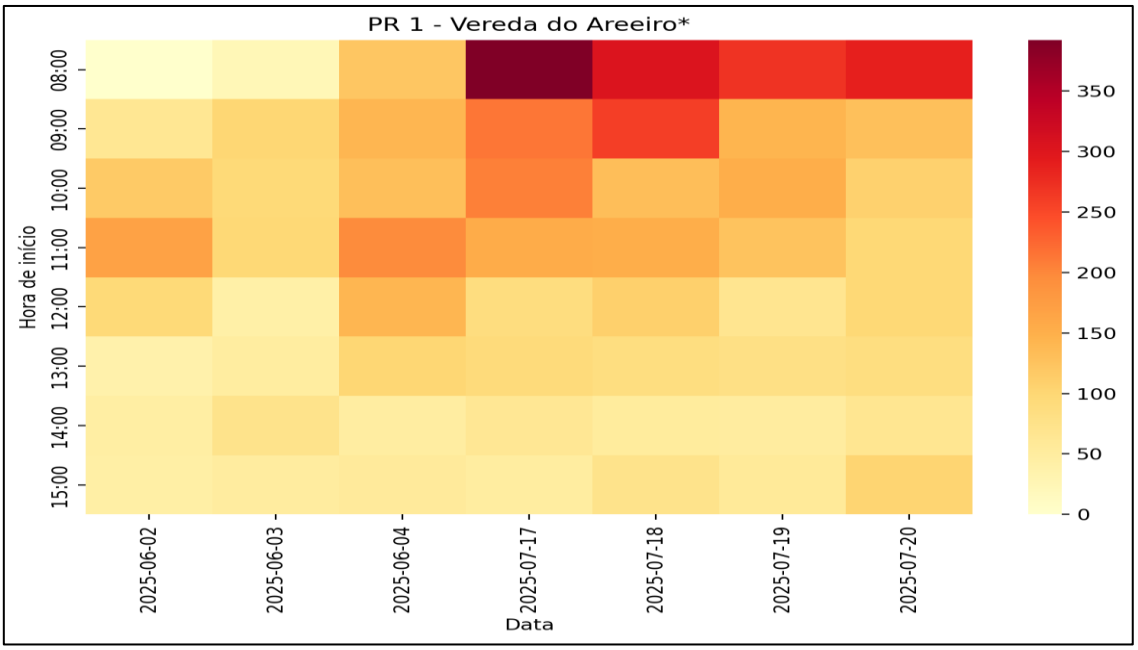
Fator	Explicação
Condições meteorológicas	Temperaturas mais amenas durante o período da manhã
Organização turística	Programação de excursões, visitas guiadas e circuitos organizados
Duração dos percursos	Preferência por concluir os percursos antes do período mais quente
Preferências operacionais	Estratégias individuais ou coletivas para evitar maior concentração ao meio do dia

8.6.1. Heatmaps de distribuição horária

Apresentam-se, de seguida, os heatmaps de distribuição horária das entradas observadas em cada percurso. A intensidade cromática representa o nível relativo de utilização em cada período, permitindo identificar visualmente os momentos de maior concentração de entradas ao longo dos dias observados.

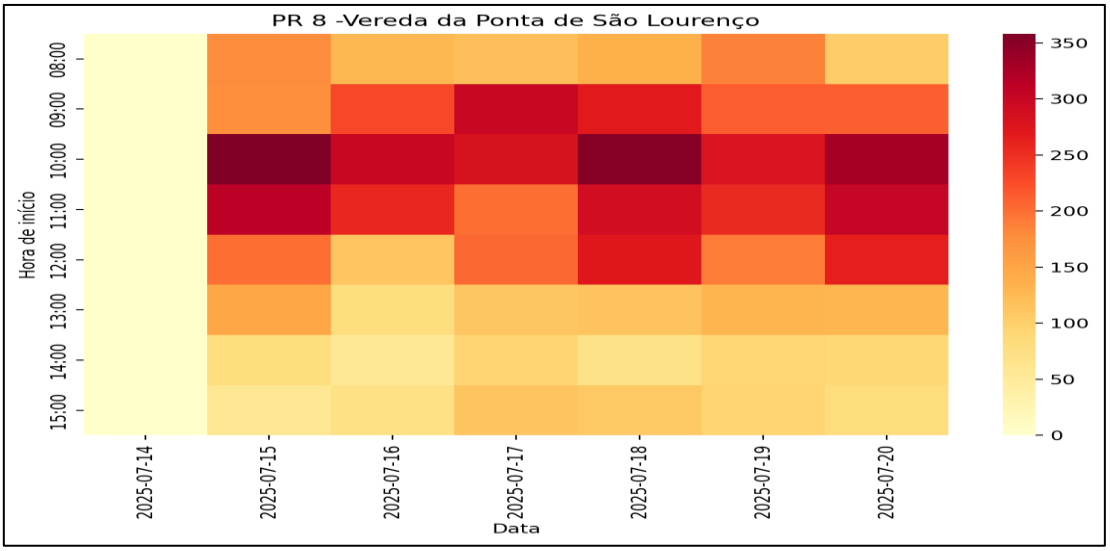
A leitura destes heatmaps constitui um complemento importante à análise estatística descritiva, na medida em que permite visualizar não apenas os níveis de intensidade, mas também a regularidade ou variabilidade temporal da utilização em cada percurso. Esta representação facilita a identificação de padrões recorrentes de concentração horária e constitui um instrumento particularmente útil para a interpretação dos ritmos de procura, bem como para a futura definição de medidas de gestão temporal e operacional dos percursos.

Figura 2 -PR 1 - Vereda do Areeiro



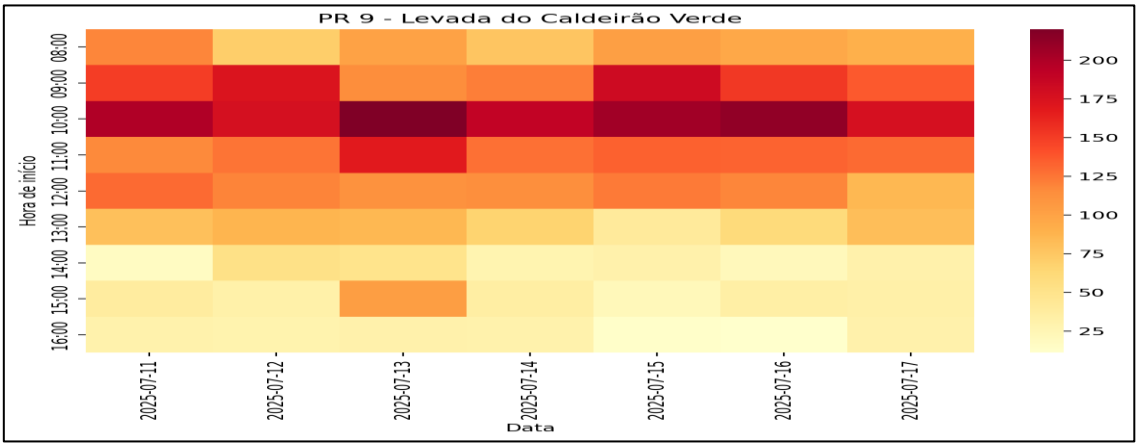
Análise: O heatmap revela concentração intensa nas primeiras horas da manhã (08:00-10:00), particularmente durante meados de julho. A intensidade diminui progressivamente ao longo do dia, com as horas da tarde (13:00-15:00) apresentando valores significativamente menores.

Figura 3- PR 8 - Vereda da Ponta de São Lourenço



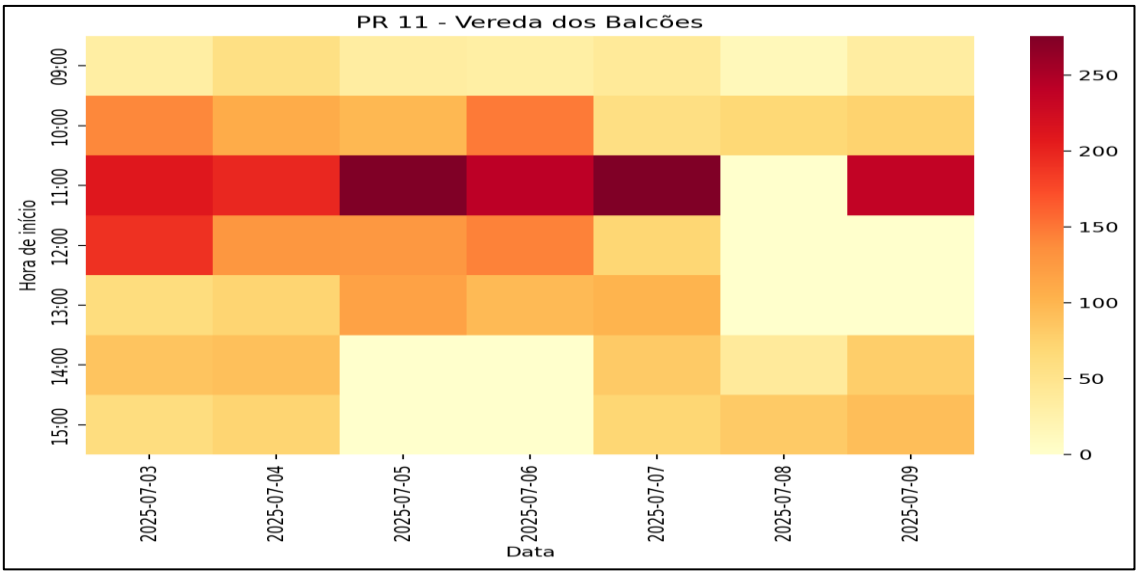
Análise: Padrão similar ao PR1, com picos de utilização concentrados entre 10:00-12:00. A visualização confirma a alta intensidade de uso deste percurso, com valores máximos atingindo aproximadamente 350 entradas em determinados períodos.

Figura 4 - PR 9 - Levada do Caldeirão Verde



Análise: Demonstra o comportamento mais estável mencionado na análise estatística, com concentração matinal (09:00-11:00) mas menor variabilidade entre dias. Os valores máximos rondam os 200, confirmando a intensidade moderada-alta.

Figura 5 - PR 11 - Vereda dos Balcões



Análise: Confirma o padrão de utilização mais moderado, com picos concentrados em torno das 11:00. Nota-se particular intensidade nos dias 5, 6 e 9 de julho, enquanto o dia 8 apresenta atividade notavelmente reduzida.

8.7. Interpretação integrada dos resultados

Considerando em conjunto os resultados obtidos na análise comparativa dos quatro percursos monitorizados, pode afirmar-se que os casos estudados apresentam perfis diferenciados de utilização, quer na intensidade global das entradas, quer na forma como essas entradas se distribuem ao longo da semana observada. Esta diferenciação confirma que a utilização dos percursos não decorre de uma lógica homogénea, sendo antes influenciada por fatores como a atratividade específica de cada percurso, a sua notoriedade turística, a duração esperada da visita, as condições de acessibilidade e os ritmos horários de procura.

A leitura integrada dos resultados permite estabelecer uma hierarquia clara entre os percursos analisados.

Tabela 9 — Hierarquia de utilização dos quatro percursos monitorizados

Posição	Percurso	Característica principal
1.º	PR8 — Vereda da Ponta de São Lourenço	Maior procura e maior intensidade média
2.º	PR1 — Vereda do Areeiro	Valores elevados e variabilidade intermédia
3.º	PR9 — Levada do Caldeirão Verde	Comportamento estável e intensidade próxima do PR1
4.º	PR11 — Vereda dos Balcões	Volume moderado e padrão identificável

O PR8 assume uma posição destacada, quer em termos de volume acumulado de entradas, quer em intensidade média diária. O PR1 e o PR9 surgem em patamares próximos, embora com comportamentos distintos ao nível da variabilidade observada, enquanto o PR11 evidencia uma utilização globalmente mais moderada.

8.7.1. Padrões transversais identificados

A observação semanal permite concluir que a utilização não depende apenas da atratividade geral de cada percurso, mas também da forma como as entradas se distribuem ao longo do tempo. Entre os fatores mais relevantes destacam-se a distribuição temporal das entradas ao longo dos dias observados, a concentração horária em janelas específicas do dia e a regularidade ou irregularidade do comportamento registado.

O padrão dominante identificado na amostra corresponde à concentração matinal das entradas, surgindo como o traço mais transversal e robusto entre os quatro percursos. Esta regularidade temporal reforça a importância de integrar a dimensão horária na gestão da capacidade de carga, uma vez que a pressão de utilização tende a acumular-se em períodos relativamente curtos, mesmo quando os valores diários globais não são extremos.

8.8. Conclusões da análise estatística dos quatro percursos monitorizados

A análise estatística baseada em contagem física de entradas ao longo de vários dias de observação permitiu caracterizar de forma consistente o comportamento de utilização dos quatro percursos pedestres analisados. Os resultados demonstram diferenças claras entre percursos quanto ao volume de entradas, variações na intensidade média diária e regularidade diferenciada do comportamento observado. Simultaneamente, foi identificada uma forte concentração horária no período da manhã, constituindo este o padrão transversal mais evidente.

Os resultados confirmam a existência de diferenças estruturais entre os percursos, tanto ao nível da procura global como na forma como esta se distribui ao longo do dia e da semana. O PR8 destacou-se como o percurso de maior intensidade de utilização, seguido do PR1 e do PR9, enquanto o PR11 apresentou um padrão de uso mais moderado.

Tabela 10 — Ranking final de utilização dos quatro percursos monitorizados

Posição	Percurso	Síntese interpretativa
1.º	PR8 — Vereda da Ponta de São Lourenço	Maior intensidade de utilização
2.º	PR1 — Vereda do Areeiro	Níveis elevados, segunda posição
3.º	PR9 — Levada do Caldeirão Verde	Níveis elevados e comportamento mais estável
4.º	PR11 — Vereda dos Balcões	Padrão de uso mais moderado

No seu conjunto, os resultados sustentam a ideia de que os percursos apresentam dinâmicas próprias de utilização. Esta constatação reforça a utilidade da monitorização por contagem física como instrumento de apoio à gestão operacional dos percursos, ao planeamento da capacidade de carga, à avaliação do uso público e à identificação de períodos críticos de saturação. Do ponto de vista científico, esta análise constitui uma base empírica sólida para a validação e calibração dos modelos teóricos de capacidade de carga implementados no SGIPA.

8.9. Análise da média de permanência nos percursos monitorizados

A análise dos dados obtidos através das contagens físicas realizadas nos percursos monitorizados permitiu não apenas quantificar a intensidade de utilização, mas também caracterizar o tempo médio de permanência dos visitantes em cada trilho. Esta dimensão assume particular relevância no contexto da gestão da capacidade de carga, uma vez que permite complementar a leitura da frequência com a duração efetiva de utilização do espaço, distinguindo percursos caracterizados por fruição rápida daqueles que implicam permanências mais prolongadas.

A informação sistematizada na base de dados relativa ao tempo de permanência possibilitou calcular, para cada registo válido, a duração observada da utilização do percurso e, subsequentemente, apurar a média de permanência associada a cada caso em análise. Os resultados evidenciam diferenças muito expressivas entre os quatro percursos monitorizados, confirmando que a pressão de uso não depende

exclusivamente do número de entradas, mas também do tempo durante o qual os visitantes permanecem no território.

A Levada do Caldeirão Verde (PR9) registou o valor médio mais elevado, com uma permanência média de 283,8 minutos, correspondente a cerca de 4,7 horas. Este resultado sugere tratar-se de um percurso com maior duração de realização e, consequentemente, com uma ocupação espacial mais prolongada por visitante. Segue-se a Vereda da Ponta de São Lourenço (PR8), com uma permanência média de 215,2 minutos (aproximadamente 3,6 horas), evidenciando igualmente um padrão de utilização prolongado, compatível com a extensão do percurso e com a natureza da experiência recreativa associada.

Tabela 11 — Média de permanência nos percursos monitorizados

Percurso	Permanência média (minutos)	Permanência média (horas)	Perfil de utilização
PR9 — Levada do Caldeirão Verde	283,8	4,7	Permanência muito prolongada
PR8 — Vereda da Ponta de São Lourenço	215,2	3,6	Permanência prolongada
PR1 — Vereda do Areeiro	65,4	1,1	Permanência intermédia-curta
PR11 — Vereda dos Balcões	26,6	0,4	Permanência curta

Num patamar claramente inferior surge a Vereda do Areeiro (PR1), com uma permanência média de 65,4 minutos, equivalente a cerca de 1,1 horas. Este valor indica um padrão de utilização significativamente mais curto, sugerindo que uma parte relevante dos visitantes poderá realizar apenas segmentos do percurso ou permanecer no espaço durante períodos limitados. Por fim, a Vereda dos Balcões (PR11) apresentou

horas), confirmando a média de permanência mais reduzida, com 26,6 minutos (aproximadamente 0,4 tratar-se de um percurso de curta duração e de fruição rápida.

Os resultados permitem, assim, identificar uma diferenciação clara entre os percursos monitorizados. Por um lado, o PR9 e o PR8 destacam-se como trilhos de permanência prolongada, associando níveis relevantes de procura a tempos médios de utilização elevados. Por outro lado, o PR1 e, sobretudo, o PR11 apresentam tempos médios substancialmente mais reduzidos, configurando padrões de uso mais breves e menos intensivos em termos de ocupação temporal do espaço.

Do ponto de vista interpretativo, esta leitura assume particular importância, na medida em que evidencia que a pressão turística resulta da combinação entre frequência de visitantes e duração da permanência. Percursos com elevada procura e permanências prolongadas tendem a concentrar não apenas um maior número de utilizadores, mas também uma ocupação territorial mais contínua, o que se traduz em maiores exigências ao nível da gestão operacional, da monitorização e da implementação de medidas de ordenamento de fluxos.

Nesta perspetiva, a Levada do Caldeirão Verde (PR9) e a Vereda da Ponta de São Lourenço (PR8) assumem particular relevância estratégica, por conjugarem intensidade de procura com tempos médios de permanência significativamente superiores aos restantes percursos analisados. Esta conjugação reforça a necessidade de integrar a dimensão temporal da utilização nos modelos de avaliação da capacidade de carga, permitindo uma leitura mais completa e operacional da pressão exercida sobre os sistemas naturais e infraestruturais.

A articulação desta análise com a leitura global da frequência dos percursos permite aprofundar a compreensão dos padrões de utilização da rede. Observa-se uma forte concentração da procura num conjunto restrito de percursos de referência, com destaque para a Vereda da Ponta de São Lourenço, a Levada das 25 Fontes e a Vereda do Areeiro, evidenciando a existência de polos dominantes de atração turística. Paralelamente, verifica-se uma marcada sazonalidade mensal, com níveis de utilização particularmente elevados entre os meses de verão e início do outono, refletindo a dinâmica da procura turística regional.

A distribuição semanal revela-se, por sua vez, relativamente equilibrada, sugerindo que a utilização dos percursos não depende exclusivamente dos fins de semana, mas apresenta um padrão contínuo ao longo da semana, possivelmente associado à combinação entre turismo organizado e visitantes independentes.

Do ponto de vista da gestão estratégica, este quadro assume especial relevância. A existência de percursos com maior concentração e permanência prolongada exige uma

abordagem diferenciada, baseada em monitorização contínua, ordenamento de fluxos e reforço das medidas de gestão da capacidade de carga. Em contrapartida, os percursos com menor pressão relativa poderão constituir uma oportunidade para políticas de redistribuição da procura, contribuindo para uma utilização territorial mais equilibrada.

Em síntese, a análise integrada dos dados de frequência e permanência confirma que a utilização dos percursos pedestres resulta de uma interação entre fatores quantitativos e temporais, evidenciando a necessidade de abordagens de gestão adaptativas. A diferenciação nos padrões de utilização constitui, assim, um elemento fundamental para a calibração operacional do modelo SGIPA, permitindo sustentar decisões mais informadas no âmbito do planeamento e da gestão sustentável da rede regional de percursos.

9. Análise global da frequência dos percursos pedestres

9.1. Enquadramento metodológico

Com base na listagem global de fluxos concluídos, foi desenvolvida uma análise agregada da frequência dos percursos ao longo do período observado. Nesta base, cada registo foi interpretado como uma ocorrência de frequência associada a uma reserva concluída, sendo a variável Intervenientes utilizada como aproximação ao número de visitantes efetivos por registo.

Esta abordagem não se limita ao número de reservas, centrando-se sobretudo no volume total de visitantes associado a cada percurso, proporcionando assim uma leitura mais rigorosa da pressão real de utilização.

Tabela 12 — Dimensão da base de dados global analisada

Métrica	Valor	Período
Registos concluídos	73.868	jul. 2025 – Nov. 2025
Total de visitantes	186.209	11 meses
Percursos analisados	33	Rede global

A dimensão da base de dados é suficientemente robusta para identificar padrões globais de frequência, percursos dominantes e ritmos de utilização ao longo dos meses e dos dias da semana.

9.2. Estrutura global da procura

A análise evidencia uma forte concentração da procura num conjunto relativamente restrito de percursos, nomeadamente 6, confirmando uma estrutura não homogénea da utilização da rede.

Tabela 13— Seis percursos mais frequentados da rede

Posição	Percurso	Visitantes	% do total	Posição estratégica
1.º	PR8 — Vereda da Ponta de São Lourenço	32.445	17,4%	Líder absoluto
2.º	PR6 — Levada das 25 Fontes	29.157	15,7%	Segunda posição
3.º	PR1 — Vereda do Areeiro	25.309	13,6%	Terceira posição
4.º	PR1.2 — Vereda do Pico Ruivo	20.452	11,0%	Quarta posição
5.º	PR9 — Levada do Caldeirão Verde	19.299	10,4%	Quinta posição
6.º	PR11 — Vereda dos Balcões	14.511	7,8%	Sexta posição

No seu conjunto, estes seis percursos concentram 141 173 visitantes, o que corresponde a 75,9% do total da procura observada. Este resultado demonstra que a utilização da rede está fortemente polarizada em torno de um grupo restrito de percursos com maior capacidade de atração.

Interpretação da concentração da procura

Do ponto de vista analítico, esta distribuição demonstra que a procura não se reparte de forma homogénea por toda a rede de percursos. Pelo contrário, existe um núcleo restrito de percursos com capacidade de atração muito superior, enquanto os restantes assumem um peso bastante mais reduzido no total da utilização observada. Esta polarização tem implicações diretas para a definição de prioridades de gestão, monitorização e ordenamento dos fluxos.

Frequência, reservas e intensidade média por percurso

Quando se compara o número de reservas com o número de visitantes, observa-se que os percursos mais frequentados são também os que acumulam maior volume de transações.

Tabela 14 — Reservas, visitantes e média de visitantes por reserva

Percurso	Reservas	Visitantes	Visitantes por reserva
PR8	12.665	32.445	2,56
PR6	11.596	29.157	2,51
PR1	10.625	25.309	2,38
PR11	4.804	14.511	3,02
PR9	7.973	19.299	2,42

Composição média dos grupos

O PR11 — Vereda dos Balcões apresenta uma média de 3,02 visitantes por reserva, valor superior ao observado nos restantes percursos mais frequentados. Esta diferença é relevante do ponto de vista da gestão, pois demonstra que a intensidade de presença num percurso não depende apenas do número de reservas, mas também da composição média dos grupos. Neste caso, o PR11 tende a receber reservas com grupos ligeiramente maiores.

Distribuição mensal da frequência

Tabela 15 — Distribuição mensal da frequência

Mês	Visitantes	% do total	Caracterização
Setembro 2025	42.678	22,9%	Pico absoluto
Agosto 2025	41.673	22,4%	Segundo pico
Julho 2025	38.678	20,8%	Terceiro pico
Outubro 2025	35.983	19,3%	Quarto pico
Novembro 2025	26.403	14,2%	Declínio gradual

Distribuição por dias da semana

A análise por dia da semana revela uma distribuição relativamente equilibrada da procura, embora com ligeira supremacia de alguns dias específicos, quando analisado no seu conjunto.

Tabela 16 — Distribuição da frequência por dia da semana em Termos

Dia da semana	Visitantes	% do total	Posição
Domingo	27.950	15,0%	1.º
Quinta-feira	27.575	14,8%	2.º
Sexta-feira	27.479	14,8%	3.º
Segunda-feira	26.825	14,4%	4.º
Terça-feira	26.817	14,4%	5.º
Quarta-feira	25.983	13,9%	6.º
Sábado	23.580	12,7%	7.º

Tendo por base a distribuição da procura por dia da semana para cada percurso, a conclusão geral é bastante clara: a procura não é homogénea na maioria dos PR.

Ou seja, embora em alguns casos as diferenças entre dias sejam moderadas, a distribuição semanal tende a apresentar dias de maior concentração e dias de menor procura, em vez de um padrão uniforme.

No conjunto dos percursos analisados, apenas 4 PR apresentam uma distribuição compatível com homogeneidade estatística, enquanto 29 PR revelam diferenças significativas entre os dias da semana. Assim, do ponto de vista global, a procura semanal é predominantemente heterogénea.

Principais PR com maior procura

Entre os percursos com maior volume de visitantes, destacam-se os seguintes:

PR8 | Vereda da Ponta de São Lourenço

É o percurso com maior procura total, com 32 445 visitantes. O dia de maior procura é o domingo, que concentra 17,9% do total semanal, enquanto o sábado representa o valor mais baixo, com 12,4%. Apesar de o coeficiente de variação ser relativamente baixo (CV = 0,110), a distribuição não é homogénea.

PR6 | Levada das 25 Fontes

Regista 29 157 visitantes. O pico ocorre à terça-feira (15,5%) e o valor mínimo ao sábado (12,2%). Também aqui a dispersão não é muito elevada (CV = 0,067), mas a distribuição continua a ser estatisticamente não homogénea.

PR1 | Vereda do Areeiro

Apresenta 25 309 visitantes, sendo um dos percursos mais procurados. O dia de maior procura é a quinta-feira, com 16,2% do total, e o de menor procura é o sábado, com 11,6%. O padrão semanal é, portanto, heterogéneo, com alguma concentração intermédia da procura.

PR1.2 | Vereda do Pico Ruivo

Com 20 452 visitantes, evidencia uma distribuição relativamente equilibrada em termos absolutos, mas ainda assim não homogénea. O máximo observa-se na quinta-feira (15,7%) e o mínimo na quarta-feira (13,1%), com CV = 0,059.

PR9 | Levada do Caldeirão Verde

Totaliza 19 299 visitantes e é, entre os percursos principais, um dos que apresenta distribuição mais próxima da uniformidade. O valor máximo ocorre na terça-feira (14,8%) e o mínimo na quarta-feira (13,4%), com CV = 0,042. Ainda assim, a distribuição não é homogénea em termos estatísticos.

PR11 | Vereda dos Balcões

Regista 14 511 visitantes. A maior procura verifica-se ao domingo (15,7%) e a menor ao sábado (12,5%). O padrão também é não homogéneo, embora com variação relativamente contida (CV = 0,062).

Interpretação

O mais interessante aqui é que, não homogénea, não significa necessariamente uma diferença muito acentuada entre dias. Em vários percursos, como PR9, PR1.2 ou PR11, os valores percentuais por dia são relativamente próximos, mas como o número total de visitantes é elevado, essas pequenas diferenças tornam-se estatisticamente significativas.

Isto significa que, na prática, há dois níveis de leitura:

1) Leitura estatística

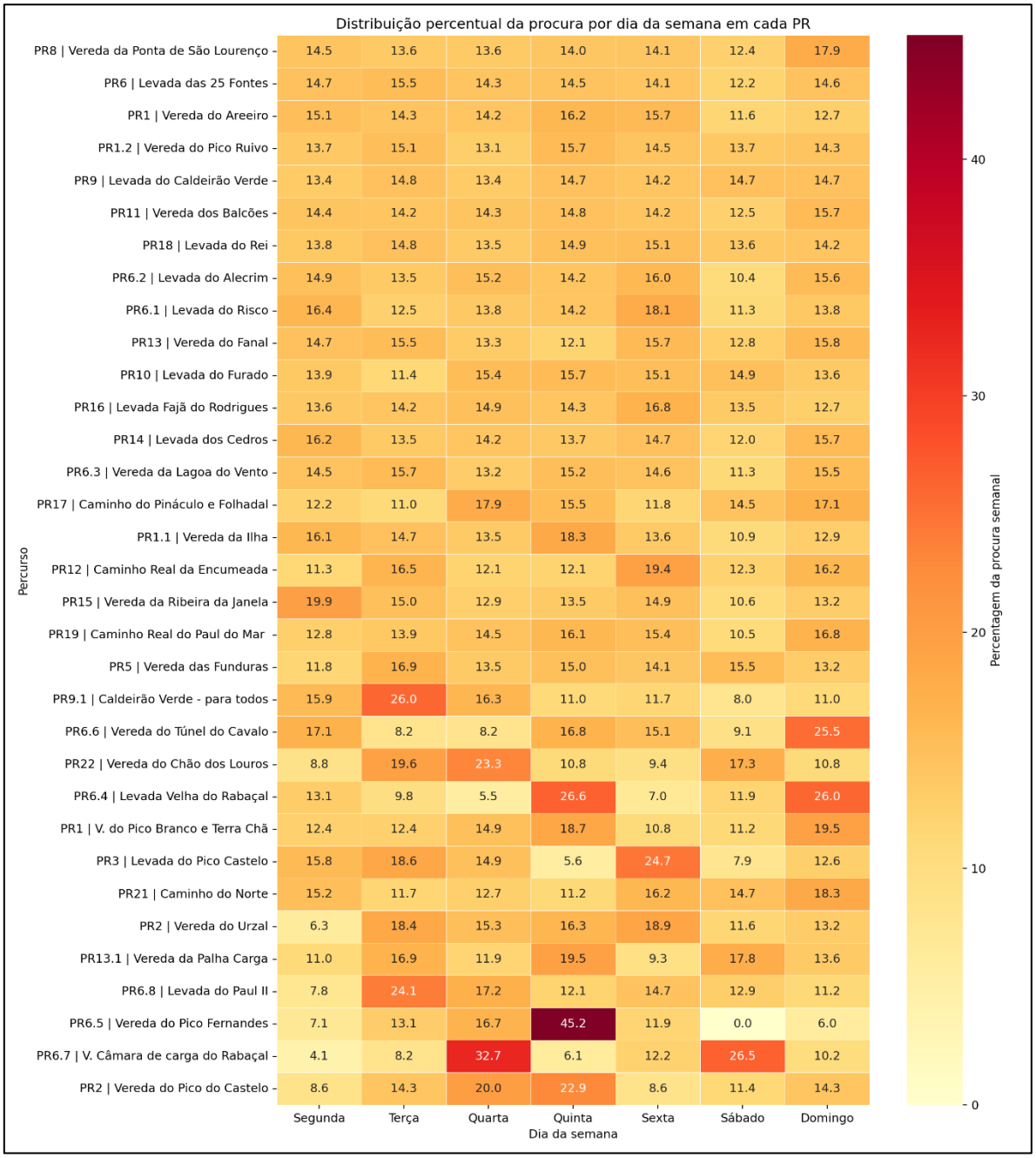
   A maioria dos percursos não tem distribuição uniforme pelos sete dias da semana.

2) Leitura substantiva

   Em alguns PR a procura é claramente concentrada em certos dias, enquanto noutros a distribuição é apenas ligeiramente desequilibrada, apesar de não ser perfeitamente homogénea.

Em termos gráficos temos então o seguinte:

Figura 6 - PR 11 - Vereda dos Balcões



Análise: O gráfico evidencia que a procura pelos percursos pedestres não é totalmente homogénea ao longo da semana, observando-se, na maioria dos PR, variações na intensidade relativa da procura entre dias. Em vários casos identificam-se dias de maior concentração, enquanto noutros a distribuição se revela mais equilibrada, embora raramente uniforme. Destacam-se alguns percursos com padrões semanais mais marcados, em que determinados dias concentram uma percentagem superior da procura total, contrastando com outros percursos onde a procura se distribui de forma mais estável entre segunda-feira e domingo. Assim, o gráfico confirma que a utilização dos percursos apresenta

comportamentos diferenciados por PR, refletindo lógicas de visita distintas e reforçando a ideia de que a procura semanal tende, em geral, a assumir uma distribuição heterogénea.

10. Simulação Dinâmica de Percursos no SGIPA: Integração de Modelação Computacional e Inteligência Artificial

A incorporação de ferramentas de simulação computacional no âmbito do SGIPA representa um avanço metodológico relevante na operacionalização do conceito de capacidade de carga turística em percursos naturais. Enquanto os modelos clássicos assentam em relações estáticas entre área disponível e número máximo de visitantes admissíveis (Cifuentes, 1992), a abordagem adotada permite evoluir para uma leitura dinâmica dos fluxos, incorporando variáveis espaciais e temporais que refletem a utilização efetiva do território.

A literatura tem vindo a demonstrar que a capacidade de carga não pode ser entendida exclusivamente como um limite físico, devendo integrar dimensões comportamentais e perceptuais, nomeadamente a perceção de congestionamento e a qualidade da experiência dos visitantes, fatores que frequentemente condicionam os níveis aceitáveis de utilização (Manning, 2007; Arnberger & Mann, 2008). Esta perspetiva reforça a necessidade de modelos capazes de representar a complexidade dos sistemas turísticos, onde o comportamento individual influencia padrões coletivos de ocupação.

Neste enquadramento, foi desenvolvido um sistema de simulação baseado em ambiente computacional, utilizando rotinas automatizadas em linguagem VBA (Visual Basic for Applications), que permitem representar a progressão de visitantes ao longo de percursos georreferenciados. O percurso físico é assim convertido numa estrutura analítica discretizada, onde cada posição corresponde a um estado potencial de ocupação, possibilitando a análise da distribuição espacial dos fluxos ao longo do tempo.

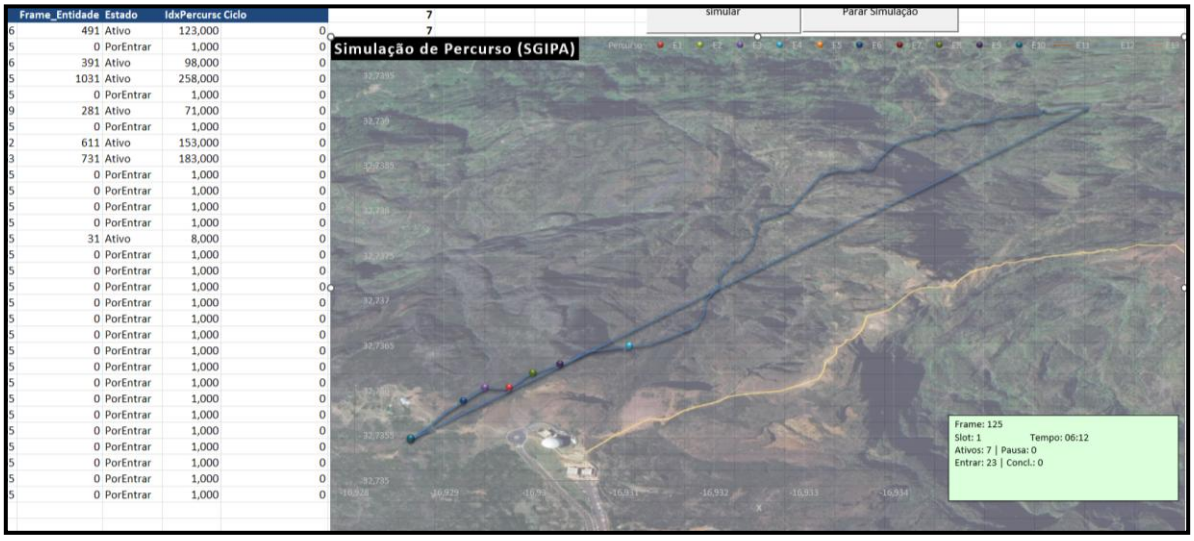
Esta modelação permite captar a dinâmica da utilização dos percursos, aproximando-se de abordagens de fluxo pedonal em que a interação entre visitantes conduz à emergência de padrões de ocupação não lineares (Helbing & Molnár, 1995). Desta forma, a simulação não se limita à reprodução de cenários, constituindo um instrumento de apoio à gestão, permitindo antecipar situações de saturação, avaliar o impacto de diferentes estratégias operacionais e contribuir para uma regulação mais eficiente dos fluxos turísticos.

Tabela 17-Menu de Geração de Simulação

Parametro	Valor
N_Entidades	14
Espacamento_Pontos	30
Velocidade_seg	0,001
Interpolacao_por_segmento	3
Loop_Infinito	1
Percurso_TempoTotal	70
Slot_Tamanho	1800
Pausa_Segundos	300
Pausa_Pontos	1200,3500,5300
Tempo_Simulacao_Fator	10
Espacamento_Entre_Entidades_s	3

A simulação foi estruturada em ciclos temporais sucessivos ("frames"), nos quais são atualizados os estados das entidades relativamente à sua posição no percurso, tempo de permanência em pontos de interesse, estado de pausa ou conclusão do trajeto. A automatização destes processos permite acompanhar em tempo quase real a evolução da densidade de utilização, identificando potenciais situações de congestionamento ou subutilização. A visualização dos resultados é suportada por painéis dinâmicos de monitorização, nos quais são representados indicadores operacionais como número de entidades ativas, visitantes em pausa, entradas pendentes e percursos concluídos. Esta capacidade de leitura imediata constitui um instrumento relevante para a gestão adaptativa, permitindo ajustar parâmetros operacionais em função das condições observadas.

Figura 7 – Representação espacial da simulação sobre traçado georreferenciado



A simulação espacial foi construída com base em mapas e coordenadas GPS dos percursos, permitindo representar graficamente o movimento das entidades ao longo do traçado. Esta visualização facilita a compreensão da distribuição efetiva dos visitantes no território, evidenciando a existência de segmentos críticos caracterizados por maior densidade de utilização ou menor velocidade de progressão. A literatura evidencia que a gestão eficaz da capacidade de carga em percursos lineares depende frequentemente da identificação destes pontos de estrangulamento, que podem condicionar a capacidade global do sistema (Li, Zhang, & Liu, 2020).

A análise do distanciamento interpessoal foi igualmente integrada na modelação, permitindo testar cenários alternativos de espaçamento mínimo entre visitantes. Este fator assume particular relevância na perceção de crowding e na qualidade da experiência recreativa, uma vez que a proximidade excessiva pode gerar impactos negativos tanto do ponto de vista psicológico como ambiental (Manning, 2007). A simulação permitiu explorar diferentes configurações de distanciamento — por exemplo, intervalos de 30 metros, 10 metros ou valores inferiores — evidenciando o impacto destas variações na fluidez do movimento e na frequência de encontros entre visitantes.

Figura 8 — Cenários comparativos de distanciamento entre visitantes.

Para além da circulação contínua ao longo do percurso, o modelo incorporou explicitamente a permanência em Pontos de Interesse (POI), reconhecendo que estes locais funcionam como zonas de concentração temporária de visitantes. A consideração do tempo médio de permanência em miradouros, cascatas ou outros elementos de elevada atratividade permite compreender de que forma a renovação espacial do fluxo é condicionada pela sincronização das chegadas e saídas. Esta abordagem está alinhada

com estudos que demonstram que a carga crítica pode ser atingida localmente mesmo quando a capacidade global do percurso não é excedida (Cifuentes, 1992; Eagles, McCool, & Haynes, 2002).

Figura 9 — Impacto do tempo de permanência em POI na dinâmica do fluxo.

A integração de Inteligência Artificial (IA) constituiu um elemento complementar essencial neste processo metodológico. Técnicas de visão computacional baseadas em modelos de deep learning, como YOLO ou MobileNet-SSD, têm demonstrado elevada eficácia na contagem automática de pessoas em ambientes exteriores complexos, permitindo recolher dados precisos sobre fluxos de visitantes em tempo real (Moreno et al., 2025). A utilização destas tecnologias possibilita calibrar os parâmetros da simulação com base em dados empíricos, aumentando a robustez das projeções e permitindo ajustar continuamente o modelo às condições reais de utilização.

Para além da recolha de dados operacionais, a Inteligência Artificial foi também utilizada na geração de imagens sintéticas de apoio à análise do distanciamento e da ocupação espacial. Estas representações visuais facilitam a comunicação de cenários alternativos de gestão, permitindo ilustrar de forma intuitiva o impacto de diferentes configurações de densidade ou organização dos fluxos.

A utilização de ferramentas de visualização espacial e sistemas inteligentes tem sido amplamente reconhecida como um elemento central no desenvolvimento de sistemas de apoio à decisão, permitindo transformar dados complexos em representações acessíveis e operacionais para diferentes stakeholders (Gretzel, 2011; Viñals et al., 2024). Estas abordagens contribuem para processos de planeamento mais

transparentes e participativos, facilitando a articulação entre gestores, decisores políticos e utilizadores no contexto da gestão sustentável de destinos turísticos.

A simulação foi ainda articulada com dimensões operacionais alargadas, nomeadamente a análise do tráfego gerado nos acessos aos percursos, a capacidade de resposta em situações de resgate e a definição de limites aceitáveis de utilização. Esta visão sistémica reconhece que a sustentabilidade do turismo de natureza depende não apenas da capacidade física do trilho, mas também da eficiência das infraestruturas de suporte e dos mecanismos de gestão de emergências (Eagles et al., 2002).

Figura 10— Integração da simulação com variáveis operacionais: tráfego, resgate e limites aceitáveis.

Em termos conceptuais, a utilização combinada de simulação computacional e Inteligência Artificial permite ultrapassar algumas das limitações estruturais dos modelos clássicos de capacidade de carga, nomeadamente a rigidez temporal, a assunção de homogeneidade comportamental e a distribuição espacial uniforme dos impactos. Ao possibilitar a modelação de cenários dinâmicos e a antecipação de situações críticas, esta abordagem reforça a capacidade de gestão adaptativa, alinhando-se com o paradigma dos Limites Aceitáveis de Mudança (LAC) e contribuindo para uma utilização mais sustentável e segura dos percursos naturais.

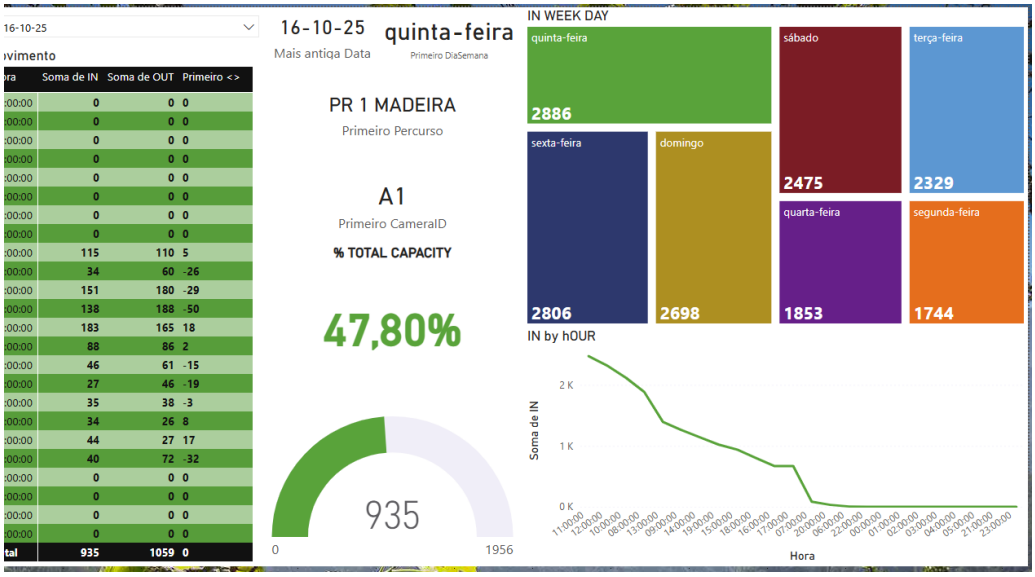
11. Projeto Piloto de Monitorização Inteligente no PR1 – Vereda do Areeiro

A implementação do sistema de monitorização automática de fluxos turísticos no percurso PR1 – Vereda do Areeiro constituiu o primeiro ensaio operacional do modelo SGIPA em contexto real, assumindo-se como projeto piloto para a validação metodológica das abordagens de capacidade de carga dinâmica. A escolha deste percurso resultou da sua elevada pressão turística, acessibilidade rodoviária direta e relevância paisagística, fatores que o tornam particularmente representativo das dinâmicas contemporâneas do turismo de natureza na Região Autónoma da Madeira.

Figura 11 — Impacto do tempo de permanência em POI na dinâmica do fluxo.

Numa fase inicial, procedeu-se à instalação de um sistema de contagem automática de visitantes baseado em tecnologia de visão computacional, permitindo registar entradas e saídas de utilizadores com elevada frequência temporal. Este processo marcou a transição de uma abordagem predominantemente estimativa para um modelo assente na recolha sistemática de dados empíricos, possibilitando a construção de um dashboard operacional de monitorização do percurso. A utilização de câmaras com suporte a algoritmos de inteligência artificial tem sido reconhecida na literatura como uma solução eficaz para a contagem de pessoas em ambientes exteriores complexos, permitindo reduzir erros associados a métodos tradicionais de observação direta ou sensores passivos .

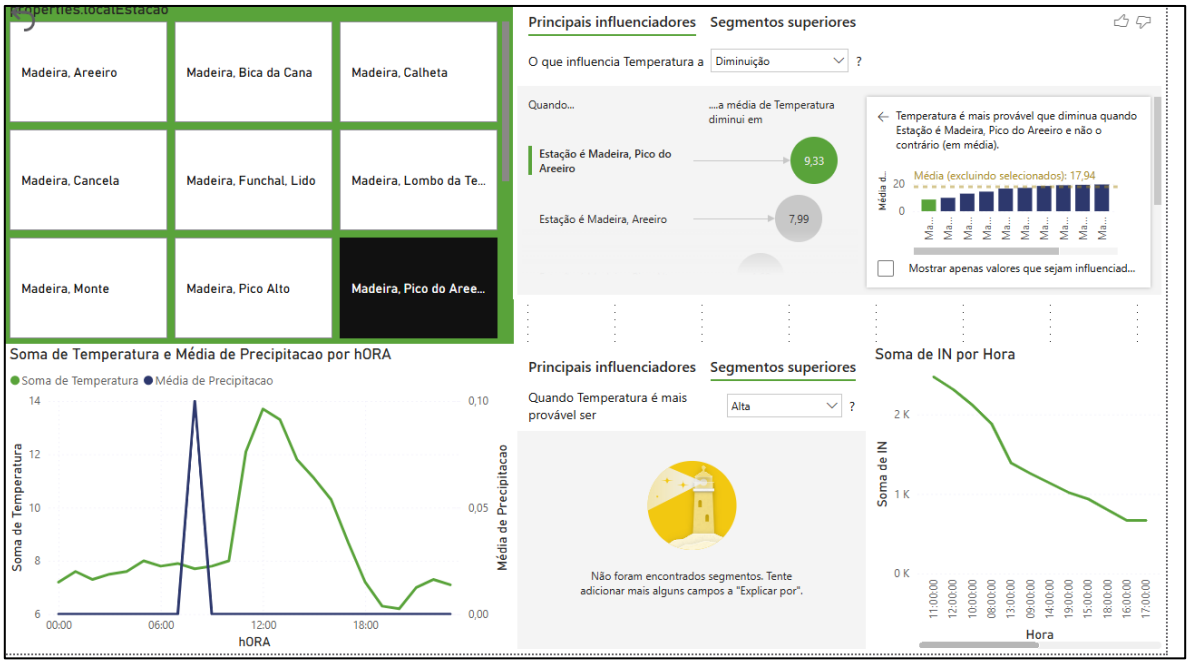
Figura 12 — Dashboard de monitorização do PR1 com indicadores de entradas, saídas e percentagem de ocupação.



A estruturação dos dados recolhidos permitiu analisar padrões temporais de utilização do percurso, evidenciando variações significativas ao longo do dia e entre diferentes dias da semana. A análise revelou concentrações horárias de maior intensidade, associadas sobretudo aos períodos da manhã e início da tarde, bem como diferenças relevantes entre dias úteis e fins de semana. Estes resultados contribuíram para a compreensão das dinâmicas reais de utilização do trilho, permitindo calibrar parâmetros operacionais como intervalos de admissões, limites recomendados de entrada e tempos médios de permanência.

Paralelamente à monitorização direta dos fluxos, foi iniciada a integração de dados meteorológicos provenientes de estações do Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA), com o objetivo de avaliar a influência das condições atmosféricas na procura turística. A análise combinada de dados de contagem e variáveis meteorológicas permitiu identificar relações consistentes entre precipitação, intensidade do vento e redução do número de visitantes presentes no percurso. Estudos sobre capacidade de carga recreativa sublinham que a variabilidade meteorológica constitui um dos principais determinantes da intensidade de utilização de áreas naturais, condicionando tanto a decisão de visita como os padrões de permanência (Manning, 2007).

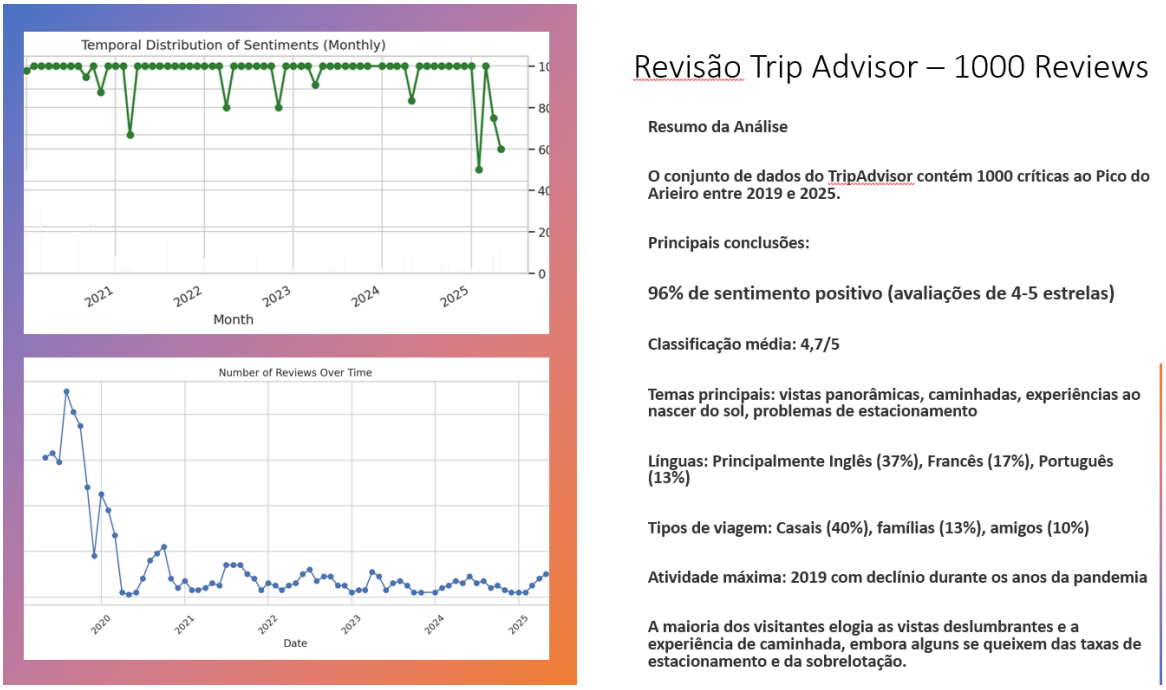
Figura 13 — Dashboard analítico com cruzamento de dados de fluxo turístico e variáveis meteorológicas no PR1.



A introdução deste sistema piloto permitiu, assim, iniciar o processo de quantificação empírica dos fatores de correção associados à chuva e ao vento, fundamentais para a construção de um modelo de capacidade de carga dinâmica ajustado às condições reais do território. A compilação de séries temporais consistentes de dados operacionais e ambientais constituiu uma base científica robusta para a definição de coeficientes de ajustamento, permitindo evoluir de limites teóricos de utilização para parâmetros adaptativos sustentados em evidência empírica.

A análise de sentimento realizada com base em avaliações digitais dos visitantes permitiu identificar padrões comportamentais relevantes para a gestão operacional do percurso PR1. De forma geral, verificou-se uma predominância de perceções positivas associadas à qualidade paisagística, à singularidade da experiência em altitude e à valorização do nascer do sol como momento de elevada atratividade turística.

Figura 14— Dashboard analítico da análise sentimento do PR1.



Contudo, a análise evidenciou igualmente sinais consistentes de pressão turística localizada, nomeadamente perceções de congestionamento em períodos específicos do dia, dificuldades de estacionamento nas zonas de acesso e preocupações relacionadas com segurança em condições meteorológicas adversas. Foram ainda identificadas referências à necessidade de melhor organização dos fluxos e à importância de informação mais clara sobre tempos de percurso e condições ambientais.

Estes resultados permitiram complementar a monitorização quantitativa dos fluxos com uma leitura qualitativa da experiência dos visitantes, contribuindo para a calibração de estratégias de regulação temporal da procura, reforço da comunicação preventiva e integração de fatores comportamentais no modelo de gestão adaptativa do percurso.

Do ponto de vista metodológico, o projeto piloto no PR1 desempenhou um papel estruturante no desenvolvimento do SGIPA, ao demonstrar a viabilidade da monitorização em tempo quase real e a utilidade dos dashboards como instrumentos de apoio à decisão territorial. Esta experiência permitiu validar a integração entre tecnologia de contagem automática, análise meteorológica, modelação de fluxos e avaliação comportamental dos visitantes, criando condições para a expansão progressiva do sistema a outros percursos da rede regional. A abordagem adotada encontra-se alinhada com recomendações internacionais relativas à gestão sustentável de áreas protegidas, que enfatizam a necessidade de sistemas de monitorização

contínua e adaptativa como base para a definição de políticas eficazes de utilização turística (Eagles, McCool & Haynes, 2002).

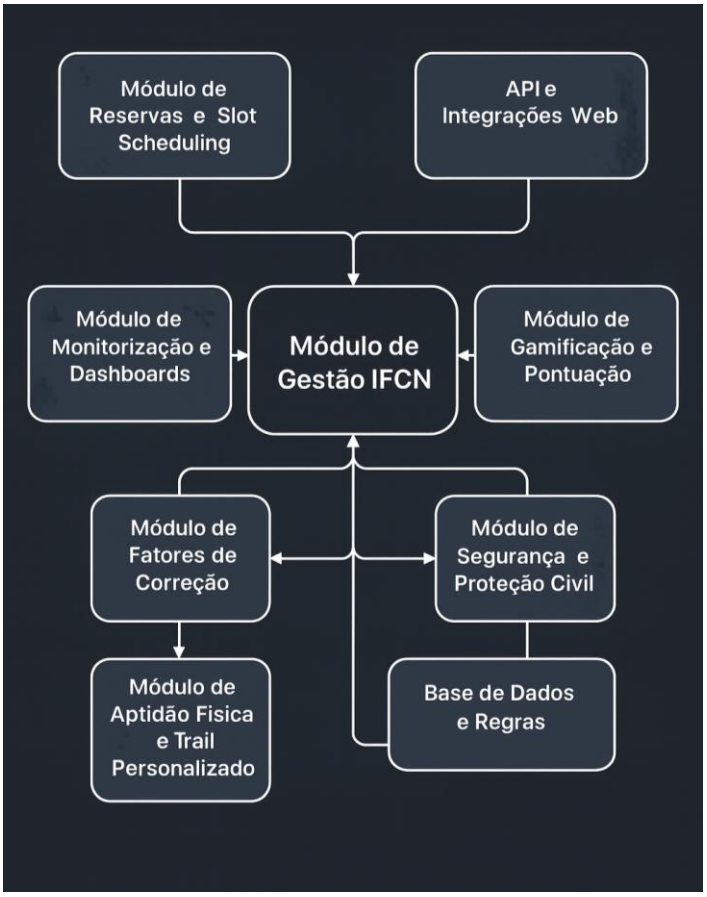
Adicionalmente, a integração de metodologias de análise de sentimento baseada em Deep Learning, aplicada a avaliações digitais dos visitantes, permitiu complementar a leitura quantitativa dos fluxos com informação qualitativa sobre perceções de congestionamento, segurança e qualidade da experiência. Esta convergência entre dados comportamentais, monitorização tecnológica e simulação de cenários reforça o potencial do SGIPA enquanto modelo inovador de governação adaptativa do turismo de natureza, contribuindo para uma gestão mais sustentável, segura e orientada por evidência científica.

12. Arquitetura Modular do SGIPA

A arquitetura funcional do Sistema de Gestão Integrado de Percursos e Atividades (SGIPA) foi concebida segundo uma lógica modular, permitindo a integração progressiva de diferentes componentes operacionais e analíticas num único ecossistema digital de gestão territorial. Esta estrutura possibilita simultaneamente a operacionalização do sistema em contexto piloto — nomeadamente no percurso PR1 Pico do Areeiro — e a sua futura escalabilidade a outros percursos naturais e atividades de natureza.

A organização modular permite que cada componente responda a funções específicas de gestão, monitorização, previsão e apoio à decisão, garantindo ao mesmo tempo uma articulação permanente entre dados operacionais, modelos matemáticos de capacidade de carga e mecanismos de intervenção territorial.

Figura 15 – Arquitetura Modular do SGIPA

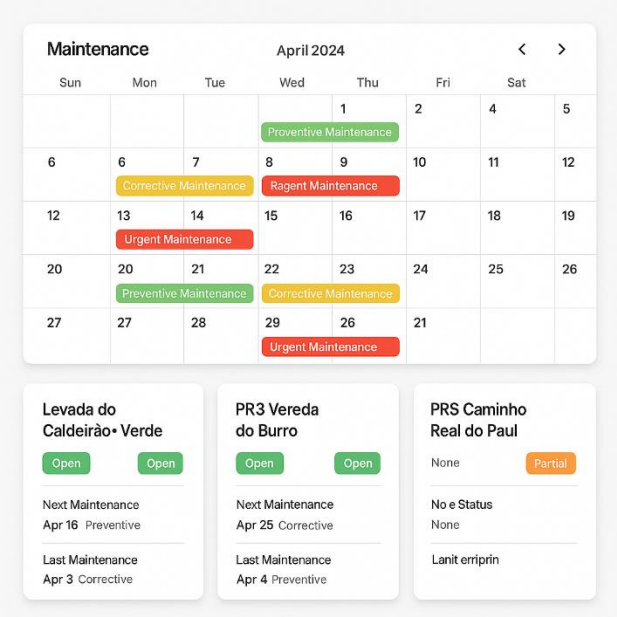


Módulo de Gestão IFCN

O módulo de gestão assume-se como o núcleo central do sistema, assegurando a coordenação operacional das diferentes dimensões associadas à utilização dos percursos naturais. Através deste módulo é possível acompanhar o estado de conservação das infraestruturas, registar ocorrências relacionadas com degradação do piso, obstruções naturais ou necessidades de reforço de sinalização, bem como calendarizar intervenções técnicas de manutenção.

A integração com sistemas de informação geográfica permite associar cada ocorrência a uma localização precisa no território, contribuindo para uma leitura espacial mais rigorosa das necessidades de gestão. Este módulo constitui, assim, a base para uma abordagem de governação adaptativa do percurso, permitindo ajustar decisões operacionais em função das condições reais de utilização.

Figura 16– Imagem Ilustrativa do Modelo IFCN



Módulo de Reservas e Slot Scheduling

A regulação temporal da procura turística é operacionalizada através do módulo de reservas, que introduz um sistema de agendamento por intervalos temporais. Este mecanismo permite distribuir de forma controlada as entradas ao longo do dia, reduzindo fenómenos de saturação localizada e contribuindo para uma utilização mais equilibrada do percurso.

A validação digital dos acessos, através de sistemas como QR Code, assegura a correspondência entre reservas efetuadas e entradas efetivas, permitindo gerar dados

de elevada precisão sobre padrões de utilização. Paralelamente, a comunicação visual dos níveis previstos de procura incentiva escolhas mais informadas por parte dos visitantes, promovendo comportamentos de dispersão temporal.

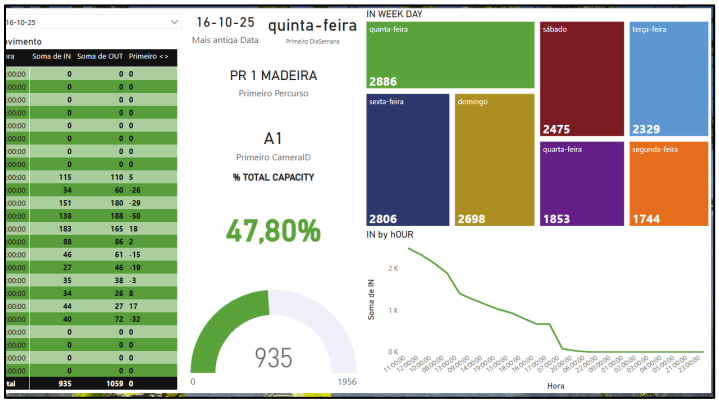
Figura 17 – Imagem Ilustrativa do Módulo Reservas

Módulo de Monitorização e Dashboards

O acompanhamento em tempo real da ocupação do percurso é garantido pelo módulo de monitorização, que integra dados provenientes de sistemas de contagem automática, sensores ambientais e registos operacionais de utilização. Esta monitorização contínua permite identificar variações dinâmicas na densidade de visitantes, bem como antecipar situações potencialmente críticas associadas a congestionamento ou sobrecarga infraestrutural.

Os painéis de controlo sintetizam indicadores operacionais relevantes, possibilitando uma leitura integrada dos fluxos turísticos e facilitando a tomada de decisão por parte das entidades gestoras. A disponibilização de dados em formatos exportáveis constitui ainda um contributo importante para o desenvolvimento de estudos científicos e para a calibração contínua dos modelos de capacidade de carga.

Figura 18 – Imagem Ilustrativa do Módulo Dashboard

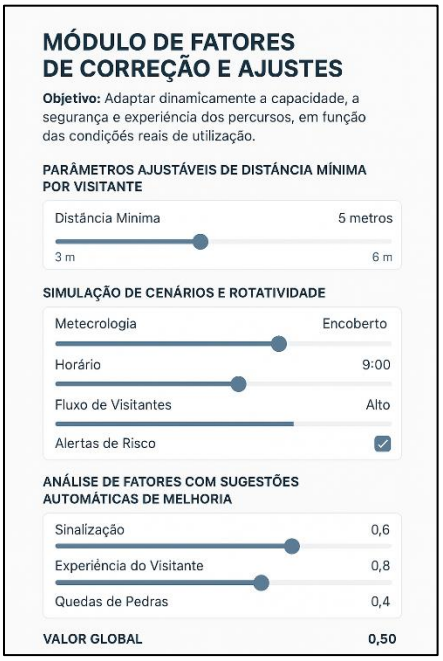


Módulo de Fatores de Correção

A gestão adaptativa da capacidade de utilização do percurso é suportada pelo módulo de fatores de correção, responsável por incorporar variáveis ambientais, meteorológicas e operacionais nos modelos de regulação de acesso. Esta componente permite ajustar limites de utilização em função de condições reais ou previstas, como alterações súbitas do estado do piso, eventos meteorológicos adversos ou variações significativas na intensidade da procura.

Ao permitir a ponderação dinâmica destes fatores, o sistema evolui de uma lógica estática de definição de limites para uma abordagem flexível e responsiva, mais adequada às características dos destinos de natureza.

Figura 19– Imagem Ilustrativa do Módulo Fatores de Correção



Módulo de Segurança e Proteção Civil

A dimensão da segurança assume particular relevância em percursos de montanha e em contextos de elevada afluência turística. O módulo de segurança integra mecanismos de registo e geolocalização de ocorrências, permitindo reduzir os tempos de resposta em situações de emergência e melhorar a coordenação com equipas de resgate e proteção civil.

A análise espacial e temporal dos incidentes possibilita ainda identificar padrões de risco e zonas críticas de utilização, contribuindo para o planeamento preventivo de intervenções e para o reforço de medidas de mitigação.

Figura 20– Imagem Ilustrativa do Módulo Protecção Civil

Módulo de Gamificação e Pontuação

A incorporação de mecanismos de gamificação introduz uma dimensão comportamental na gestão dos percursos naturais. Através de sistemas de pontuação associados ao cumprimento de horários de acesso, respeito pelas normas ambientais ou participação em ações de conservação, o sistema procura incentivar práticas de utilização mais responsáveis.

Este módulo contribui para a criação de uma comunidade de utilizadores mais consciente do impacto das suas ações, promovendo simultaneamente a fidelização e o envolvimento ativo na preservação do território.

Figura 21– Imagem Ilustrativa do Módulo Gamificação

Módulo de Aptidão Física e Trail Personalizado

A personalização da experiência turística constitui outra dimensão relevante do sistema. O módulo de aptidão física permite ajustar recomendações de percursos em função do perfil do visitante, reduzindo riscos associados a esforço inadequado e promovendo uma utilização mais segura e equilibrada do território.

Esta abordagem abre caminho a modelos de gestão que consideram não apenas a capacidade de carga global do percurso, mas também a adequação individual da experiência turística.

API, Integrações Web e Base de Dados

A interoperabilidade digital do sistema é assegurada através de mecanismos de integração com plataformas externas, permitindo incorporar dados meteorológicos, sistemas de mobilidade, aplicações turísticas e outras fontes relevantes. A base de dados central garante a consistência, rastreabilidade e atualização contínua da informação, constituindo o suporte fundamental para o desenvolvimento de modelos preditivos e simulações operacionais.

Perspetivas de Continuidade do Estudo

A estrutura modular proposta permite que o SGIPA evolua progressivamente para um modelo integrado de gestão adaptativa dos percursos naturais. A recolha sistemática de dados operacionais e comportamentais possibilitará o refinamento contínuo dos

modelos matemáticos de capacidade de carga, a validação empírica de estratégias de regulação temporal da procura e o desenvolvimento de ferramentas preditivas de suporte à decisão.

Neste contexto, o projeto piloto no percurso PR1 Pico do Areeiro constitui uma etapa fundamental para testar a viabilidade técnica e científica do sistema, servindo de base para futuras aplicações em diferentes percursos e tipologias de atividades de natureza na Região Autónoma da Madeira.

13. Conclusões Preliminares

O desenvolvimento do Sistema de Gestão Integrado de Percursos e Atividades (SGIPA) representa uma evolução estrutural na forma como a capacidade de carga turística é conceptualizada e operacionalizada em contextos de turismo de natureza. Ao contrário das abordagens tradicionais, predominantemente estáticas e baseadas em estimativas pontuais, o SGIPA propõe uma integração sistémica entre modelos matemáticos, monitorização tecnológica, análise comportamental e simulação dinâmica. Esta convergência metodológica permite uma leitura mais realista e adaptativa dos processos de utilização dos percursos naturais, respondendo à crescente complexidade dos padrões turísticos contemporâneos.

A incorporação de modelos quantitativos rigorosos, capazes de integrar variáveis espaciais, temporais e ambientais, constitui uma base essencial para a definição de limites operacionais ajustáveis às condições reais do território. Paralelamente, a utilização de sistemas tecnológicos de monitorização em tempo real — nomeadamente através de câmaras com suporte a algoritmos de inteligência artificial — possibilita a recolha contínua de dados empíricos sobre fluxos de visitantes, contribuindo para uma gestão informada e baseada em evidência. A análise dos padrões comportamentais dos utilizadores, incluindo tempos de permanência em Pontos de Interesse (POI) e distribuição horária das visitas, permite compreender de forma mais aprofundada os mecanismos que condicionam a pressão turística sobre os ecossistemas.

Neste contexto, a simulação dinâmica assume um papel central enquanto ferramenta prospetiva, permitindo antecipar cenários de utilização e testar diferentes estratégias de regulação antes da sua implementação no terreno. A capacidade de resposta imediata proporcionada pela monitorização em tempo quase real reforça a lógica de gestão adaptativa, alinhada com o paradigma dos Limites Aceitáveis de Mudança (LAC), contribuindo para uma utilização mais sustentável e segura dos percursos naturais.

13.1. Contributos Científicos

O SGIPA constitui um contributo relevante para o avanço do conhecimento científico na área da gestão sustentável de destinos turísticos, ao demonstrar a viabilidade de operacionalizar modelos teóricos de capacidade de carga através da integração de tecnologias digitais e análise territorial especializada. A articulação entre dados empíricos, modelação matemática e simulação computacional permite ultrapassar algumas das limitações identificadas na literatura, nomeadamente a rigidez temporal e

a assunção de homogeneidade espacial associadas aos modelos clássicos (Manning, 2007; Arnberger & Mann, 2008).

A aplicação prática destas metodologias em contextos reais de gestão contribui igualmente para o desenvolvimento de abordagens interdisciplinares, combinando conhecimentos provenientes do turismo, das ciências ambientais, da engenharia de sistemas e da ciência de dados. Este caráter integrador reforça a relevância científica do SGIPA enquanto framework replicável em outros territórios insulares ou áreas protegidas com características semelhantes.

Além disso, o sistema promove uma compreensão mais aprofundada dos padrões de utilização turística, permitindo analisar a relação entre intensidade de visitação, perceção de crowding e qualidade da experiência. Esta dimensão comportamental, frequentemente negligenciada em abordagens exclusivamente quantitativas, constitui um elemento essencial para a definição de estratégias de gestão equilibradas e orientadas para a sustentabilidade.

13.2. Inovações Metodológicas

Entre as principais inovações metodológicas introduzidas pelo SGIPA destaca-se o desenvolvimento de um modelo de ponderação adaptativa para fatores de correção, permitindo ajustar a capacidade operacional dos percursos em função de variáveis ambientais como precipitação, intensidade do vento ou condições de visibilidade. A integração destes fatores na modelação matemática representa um avanço significativo face a abordagens que consideram apenas parâmetros físicos ou espaciais.

A gestão temporal por slots, suportada por evidência empírica recolhida através de sistemas de monitorização automática, constitui outra inovação relevante. Esta abordagem permite regular a entrada de visitantes de forma faseada, reduzindo a probabilidade de formação de concentrações excessivas e promovendo uma distribuição mais equilibrada da procura ao longo do dia. A integração explícita dos Pontos de Interesse (POI) na modelação matemática contribui igualmente para uma representação mais realista dos fluxos, reconhecendo que a capacidade efetiva de um percurso pode ser condicionada por locais específicos de elevada atratividade.

Adicionalmente, o desenvolvimento de um sistema de monitorização em tempo real e de uma plataforma modular e escalável permite adaptar o SGIPA a diferentes contextos territoriais e níveis de complexidade operacional. Esta flexibilidade metodológica reforça o potencial de replicação do sistema, contribuindo para a sua aplicação em redes de percursos mais extensas ou em destinos turísticos com características distintas.

13.3. Impactos Esperados

A implementação do SGIPA deverá traduzir-se em impactos positivos significativos ao nível da sustentabilidade ambiental dos percursos naturais, ao permitir uma gestão mais eficiente da intensidade de utilização e reduzir a probabilidade de degradação dos ecossistemas sensíveis. A otimização da experiência dos visitantes constitui igualmente um resultado esperado, uma vez que a regulação dos fluxos e a redução de situações de crowding contribuem para a valorização da qualidade recreativa e interpretativa dos trilhos.

Do ponto de vista da segurança, a monitorização contínua e a análise prospetiva de cenários de utilização poderão contribuir para uma resposta mais eficaz em situações de emergência ou resgate, reduzindo riscos associados à sobrecarga operacional dos percursos. A eficiência na gestão territorial deverá igualmente beneficiar da utilização de dashboards analíticos e sistemas de apoio à decisão, permitindo uma alocação mais racional de recursos humanos e logísticos.

Finalmente, o SGIPA poderá constituir uma base científica robusta para a formulação de políticas públicas relacionadas com a gestão do turismo de natureza, fornecendo evidência empírica e modelos analíticos que suportem a definição de regulamentos, limites de utilização ou estratégias de investimento em infraestruturas. A articulação entre conhecimento científico e prática operacional reforça, assim, o potencial do sistema enquanto instrumento estratégico para o desenvolvimento sustentável dos destinos turísticos.

References

Arnberger, A., & Mann, C. (2008). Crowding in European forests: A review of recent research and implications for forest management and policy. *Forestry, 81*(4), 559–571. https://doi.org/10.1093/forestry/cpn034

Bhutia, S. T., & Guite, L. T. S. (2025). Analyzing carrying capacity of Dzongri tourist site, Kanchendzonga National Park for sustainable geotourism development. *Advances in Geographical and Environmental Sciences*. https://doi.org/10.1007/978-981-96-3817-8_8

Ceballos-Lascuráin, H. (1996). *Tourism, ecotourism, and protected areas*. IUCN. https://doi.org/10.2305/IUCN.CH.1996.7.en

Cifuentes, M. (1992). *Determinación de capacidad de carga turística en áreas protegidas*. CATIE. https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/1139

Eagles, P. F. J., McCool, S. F., & Haynes, C. D. (2002). *Sustainable tourism in protected areas: Guidelines for planning and management*. IUCN. https://digitallibrary.un.org/record/488792

Gretzel, U. (2011). Intelligent systems in tourism: A social science perspective. *Annals of Tourism Research, 38*(3), 757–779. https://doi.org/10.1016/j.annals.2011.04.014

Helbing, D., & Molnár, P. (1995). Social force model for pedestrian dynamics. *Physical Review E, 51*(5), 4282–4286. https://doi.org/10.1103/PhysRevE.51.4282

Lime, D. W., & Stankey, G. H. (1971). Carrying capacity: Maintaining outdoor recreation quality. In *Proceedings of the Recreation Symposium* (pp. 174–184). USDA Forest Service. https://doi.org/10.4324/9780429025983-10

Manning, R. E. (2007). *Parks and carrying capacity: Commons without tragedy*. Island Press.

Moreno, H., Gómez, A., & Andújar, D. (2025). Deep learning-based video analysis for visitor detection and tracking in protected areas. *Journal of Outdoor Recreation and Tourism, 50*, 100890. https://doi.org/10.1016/j.jort.2025.100890

Mota, M., Franco, S., & Santos, N. (2021). Carrying capacity assessment in Laurissilva trails. *Tourism Management Perspectives, 38*, 100115. https://doi.org/10.2478/ejthr-2021-0023

Nepal, S. K. (2000). Tourism in protected areas: The Nepalese Himalaya. *Annals of Tourism Research, 27*(3), 661–681. https://doi.org/10.1016/S0160-7383(99)00105-X

Newsome, D., Moore, S. A., & Dowling, R. K. (2013). *Natural area tourism: Ecology, impacts and management*. Channel View Publications. https://doi.org/10.2307/jj.27195461

Papageorgiou, K., & Brotherton, I. (1999). A management planning framework based on ecological, perceptual and economic carrying capacity: The case study of Vikos–Aoos National Park, Greece. *Journal of Environmental Management, 56*(4), 271–284. https://doi.org/10.1006/jema.1999.0285

Pickering, C. M., & Hill, W. (2007). Impacts of recreation and tourism on plant biodiversity and vegetation in protected areas in Australia. *Journal of Environmental Management, 85*(4), 791–800. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2006.11.021

Picazo-Córdoba, H., Belmonte-Serrato, F., & Ballesteros-Pelegrín, G. A. (2021). Study of the load capacity in river areas with intensive recreational use: El Salto del Usero, Murcia, Spain. *Revista Geográfica Venezolana*.

Quintal, M. D. D. P., & Pavón, R. G. S. (2020). Tourism carrying capacity for beaches in Tulum National Park, Mexico. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*. https://doi.org/10.2495/ST200161

Rocha, C. H. B., Fontoura, L. M., Vale, W. B. D., & da Silveira, F. J. (2021). Carrying capacity and impact indicators: Analysis and suggestions for sustainable tourism in protected areas. *World Leisure Journal*. https://doi.org/10.1080/16078055.2021.1888000

Saveriades, A. (2000). Establishing the social tourism carrying capacity for the tourist resorts of the east coast of the Republic of Cyprus. *Tourism Management, 21*(2), 147–156. https://doi.org/10.1016/S0261-5177(99)00044-8

Sejati, A. W., Putri, S. N. A. K., Tyas, W. P., & Husna, I. N. (2025). Predicting urban carrying capacity to support sustainable tourism using GIS. *Journal of Policy Research in Tourism, Leisure and Events*. https://doi.org/10.1080/19407963.2023.2279065

Shelby, B., & Heberlein, T. A. (1986). *Carrying capacity in recreation settings*. Oregon State University Press.

Stankey, G. H., Cole, D. N., Lucas, R. C., Petersen, M. E., & Frissell, S. S. (1985). *The Limits of Acceptable Change (LAC) system for wilderness planning*. USDA Forest Service.

Viñals, M. J., Orozco Carpio, P. R., Teruel, P., & Gandía-Romero, J. M. (2024). Real-time monitoring of visitor carrying capacity in crowded historic streets through digital technologies. *Urban Science, 8*(1). https://doi.org/10.3390/urbansci8040190

Wagar, J. A. (1964). The carrying capacity of wild lands for recreation. *Forest Science Monograph, 7*. https://doi.org/10.1093/forestscience/10.s2.a0001