IMPACTOS AMBIENTAIS DOS PROJETOS DE INFRAESTRUTURA: UMA PROPOSTA METODOLÓGICA PARA IDENTIFICAÇÃO E QUANTIFICAÇÃO

THE ENVIRONMENTAL IMPACTS OF INFRASTRUCTURE PROJETS: A METHODOLOGICAL PROPOSAL FOR THE IDENTIFICATION AND QUANTIFICATION

Adolpho Guido de Araújo [1]; Alexandre Duarte Gusmão [2]; Marcos David dos Santos [3;] Arnaldo Manoel Pereira Carneiro [4]; Rachel Perez Palha [5].

[1]Doutor em Engenharia Civil | adolpho.guido@upe.br | UPE | Recife, Brasil; [2]Doutor em Engenharia Civil | gusmao.alex@upe.br | UPE | Recife, Brasil; [3]Mestre | marcos.david@ufpe.br | UFPE | Recife, Brasil; [4]Doutor em Engenharia Civil | arnaldo.carneiro@ufpe.br | UFPE | Recife, Brasil; [5]Doutora em Engenharia de Produção | rachel.palha@ufpe.br | UFPE | Recife, Brasil.

Resumo:
O desenvolvimento acelerado das construções impulsionou positivamente a economia, mas causaram poluições ambientais. O objetivo deste artigo foi propor um modelo para quantificar e identificar as causas dos impactos ambientais em projetos de infraestrutura urbana na fase pré-construção. A metodologia incluiu dez impactos ambientais e seis atividades construtivas, sendo distribuída em três fases: quantificação, elaboração de um inventário e identificação das causas dos impactos ambientais. Os resultados dos projetos A, B e C confirmaram cinco impactos ambientais com quantificações das razões unitárias normalizadas máximas, a saber: emissões de gases do efeito estufa com 1,00, 1,00 e 1,00; uso de energia com 0,99, 0,99 e 1,00; poluição sonora com 0,84, 0,89 e 1,00; uso das águas com 0,95, 1,00 e 0,96 e uso de recursos e matéria-prima com 1,00, 1,00 e 1,00, causados pelos métodos construtivos, máquinas, materiais e condições ambientais do projeto. Esta proposta foi a primeira iniciativa para investigar analiticamente e previamente o desempenho ambiental das futuras obras de infraestrutura, auxiliando nas estratégias da fase pré-construção. Finalmente, este primeiro esforço poderá evoluir para criar oportunidades para evitar, mitigar, reduzir ou aceitar das obras os efeitos ambientais de infraestrutura nos países em desenvolvimento.

Palavras-chave:
Impacto Ambiental; Metodologia de Avaliação; Infraestrutura Urbana; Pré-Construção; Planejamento.

Abstract:
The accelerated development of construction has positively boosted the economy but caused environmental pollution. The objective of this article was to propose a model to quantify and identify the causes of environmental impact in urban infrastructure projects during the pre-construction phase. The methodology included ten environmental aspects and six construction activities, distributed in three phases: quantification, preparation of an inventory and identification of the main causes of environmental aspects. The results of projects A, B and C confirmed five environmental aspects with quantifications of the maximum normalized unitary ratios, namely: greenhouse gas emissions with 1.00, 1.00 and 1.00; energy use with 0.99, 0.99 and 1.00; noise pollution with 0.84, 0.89 and 1.00; water use with 0.95, 1.00 and 0.96 and use of resources and raw materials with 1.00, 1.00 and 1.00, caused by the construction methods, machines, materials and environmental conditions of the project. This proposal was the first initiative to analytically and previously investigate the environmental performance of future infrastructure works, assisting in the strategies of the pre-construction phase. Finally, this initial effort may evolve to create opportunities to avoid, mitigate, reduce or accept the environmental effects in the infrastructure projects in developing countries.

Keywords:
Environmental Impact; Assessment Methodology; Urban Infrastructure; Pre-Construction; Planning.

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento acelerado das construções apesar de impulsionar positivamente a economia, ocasionou poluições ambientais (Li; Wang, 2022), fazendo com que a redução do impacto ambiental da indústria da construção se transformasse numa questão atual e importante (Fredriksson; Nolz; Seragiotto, 2021). As equipes de projetos buscaram soluções resilientes para as ameaças das construções no ambiente natural (Hopfe; McLeod, 2021) e a partir de 1990, a indústria demonstrou mais interesse nas questões da sustentabilidade (Det Udomsap; Hallinger, 2020), permeando a sustentabilidade em muitas áreas do setor da construção civil (Hatefi; Tamošaitiene, 2018; Thomé *et al.*, 2016). No entanto, as inadequações das informações ambientais nos documentos de planejamento forneceram limitações para avaliações ambientais estratégicas junto aos tomadores de decisões (Kabir; Morgan, 2020), além das incertezas relacionada às emissões da fase de construção (Arogundade; Dulaimi; Ajayi, 2023). A compreensão das interações sociais, ambientais e econômicas nos projetos criou um melhor desenvolvimento da economia verde no setor de infraestrutura (Kennedy; Zhong; Corfee-Morlot, 2016), ajudando a desenvolver projetos urbanísticos preocupados com a preservação do meio ambiente.

Os modelos preditivos forneceram informações importantes sobre os ecossistemas urbanos e revelaram as características únicas dos planejamentos urbanos (Casanelles-Abella *et al.*, 2021). Os estudos dos fatores causais forneceram análises pró-ativas e reativas aos tomadores de decisões com a possibilidade de melhoria do plano de construção e também minimizar os problemas durante a construção no canteiro de obras. Observou-se a inexistência de um modelo estritamente objetivo e capaz de analisar os mais importantes impactos ambientais. O objetivo deste trabalho foi desenvolver uma metodologia de avaliação ambiental da gravidade total unitária normalizada dos projetos de infraestrutura urbana que permitisse: (i) quantificar dez impactos ambientais externalizados pelas seis principais atividades construtivas na fase de pré-construção, (ii) comparar de forma unitária os impactos ambientais em três casos reais, desenvolvendo um inventário ambiental e (iii) identificar as causas dos impactos ambientais para fornecer informações capazes de alterar a elaboração dos projetos e reduzir os impactos ambientais ainda durante a fase de planejamento de obras (pré-construção).

2. REVISÃO DE LITERATURA

O termo desenvolvimento sustentável foi compreendido como a melhoria da qualidade de vida com ambientes saudáveis e do equilíbrio entre as dimensões sociais, econômicas e ambientais, garantindo condições adequadas tanto para as gerações presentes quanto para as futuras (Ortiz; Castells; Sonnemann, 2009). A definição de sustentabilidade mais adotada foi a da Comissão *Brundtland*, que a descreveu como o desenvolvimento para atender às necessidades do presente, sem comprometer as gerações futuras (Carter; Rogers, 2008). Para Huang *et al.* (2021), o desenvolvimento ecológico e sustentável é uma tendência para a indústria da construção e da infraestrutura na promoção da ecologização do mundo.

Existem poucos estudos sobre quantificações das questões ambientais na fase de planejamento da construção (projetos). Os bancos de dados da Sociedade Americana de Engenharia Civil e Compendex Ei apresentaram 2% de artigos sobre métodos quantitativos para avaliação ambiental na indústria da construção (Chen; Li; Wong, 2005). Em outro estudo, 15 anos depois, na base de dados da *Web of Science,* foi confirmada a quantidade reduzida de publicações sobre avaliação ambiental na fase de planejamento, com apenas 2,54% dos artigos tratando sobre o assunto (Araújo; Carneiro; Palha, 2020a). Dado o exposto, urge estabelecer uma metodologia para identificação e quantificação dos possíveis impactos ambientais dos projetos urbanos ainda na fase de pré-construção (planejamento).

3. MÉTODOS

A metodologia de avaliação ambiental da gravidade total unitária normalizada foi dividida em três fases: 3.1 Quantificação, 3.2 Desenvolvimento de um inventário ambiental e 3.3 Identificação das causas dos impactos ambientais estudados e aplicada em três casos reais de projetos de infraestrutura urbana para construção de bairros planejados nas cidades de Santana do Ipanema/Al (Projeto A), Arapiraca/Al (Projeto B) e Estância/SE (Projeto C).

3.1. QUANTIFICAÇÃO

A primeira fase foi a obtenção de três casos reais de infraestrutura urbana de uma empresa urbanizadora com seis atividades construtivas comuns, a saber: terraplenagem (movimentação de terras), drenagem (instalação de manilhas de concreto subterrâneas), sistema de abastecimento de água (instalação de tubulações de PVC), sistema de energia elétrica (instalações de postes de concreto), pavimentação (pavimentação com pedras de paralelepípedos) e meio-fio (instalação de meio-fio de concreto), que foram selecionadas por conter informações quantitativas precisas e completas ainda na fase de planejamento.

Procedeu-se, em seguida, com a seleção de dez impactos ambientais: Partículas Totais em Suspensão (PTS), Gases do Efeito Estufa (GEE), Poluição Sonora (PS), Alteração do Solo (AS), Poluição do Solo (PSOLO), Poluição das Águas (PA), Uso de Recurso e Matéria-Prima (URMP), Resíduo da Construção e Demolição (RCD), Uso da Água (UA) e Uso de Energia (UE). Os dez impactos ambientais foram calculados nas seis atividades construtivas: Terraplenagem (T), Sistema de Drenagem Pluvial (SDP), Sistema de Abastecimento de Água (SAA), Sistema de Energia Elétrica (SEE), Pavimentação (P) e Meio-Fio (MF). Os métodos para as quantificações absolutas dos dez impactos ambientais foram quantificados por equações e podem ser encontrados na publicação indexada na *Web of Science* de Araújo; Carneiro; Palha (2020a).

3.2. DESENVOLVIMENTO DE UM INVENTÁRIO AMBIENTAL

A metodologia estabelecida para elaboração do inventário obedeceu a seguinte cronologia:

- A partir das quantidades absolutas dos impactos ambientais foram calculados as respectivas quantidades unitárias para cada uma das seis atividades construtivas. Em seguida, os valores das seis atividades foram somados a cada um dos projetos, então normalizados de 0 a 1 (o valor total de cada projeto dividido pelo maior valor obtido entre os três projetos).
- Realizada a comparação dos valores normalizados entre projetos; e, por conseguinte, foi desenvolvido o inventário com os valores médios das quantidades unitárias dos impactos.

3.3. IDENTIFICAÇÃO DAS CAUSAS

Os dez impactos ambientais reconhecidos nas seis atividades de infraestrutura urbana foram estudados e seus valores comparados com base nas medidas estatísticas descritivas do inventário para finalmente selecionar e confirmar as causas dos impactos ambientais com aplicação do diagrama de *Ishikawa* explicado na íntegra na publicação de Araújo *et al.* (2025).

O diagrama de Ishikawa foi sugerido para solucionar uma situação, onde a meta ou objetivo foi colocado na cabeça do peixe e os fatores contribuintes categorizados na espinha de forma sistemática (Beckford, 2002). A aplicação do diagrama de *Ishikawa* ajudou a obter de forma organizada, sistematizada e objetiva as relações causais das quatro categorias estabelecidas: máquinas, materiais, métodos e fatores ambientais. As causas foram obtidas com base nas variáveis das equações de quantificação dos impactos ambientais.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. QUANTIFICAÇÃO

O impacto **PTS** foi induzido pela terraplenagem e pelas condições ambientais do local, tais como: dias de precipitação, velocidade do vento, taxa de lodo superficial nas estradas e as distâncias médias de transporte, conforme afirmado por Fedorova *et al.* (2021), que citaram as influências das intensidades de chuva e taxa de pressão do vento na poluição atmosférica. No caso do **GEE**, o tipo de combustível, a concepção do projeto, a distância percorrida, o processo de fabricação e a quantidade dos materiais motivaram o aumento das emissões de $KgCO_2e$, em concordância com Zhang *et al.* (2021), que reconheceram a indústria da construção como uma das maiores contribuintes para as emissões de carbono.

A **PS** foi mais significativa na atividade de terraplenagem nos projetos A, B e C que obtiveram maiores poluições sonoras com 70,86 dB, 67,74 dB e 76,76 dB, respectivamente. Tais resultados, foram influenciados pela quantidade, pelo nível de pressão sonora emitida dos equipamentos e distância da fonte (equipamentos) ao receptor (vizinho) sem barreiras físicas. A **AS** foi influenciada pelas concepções dos projetos, com base na relação da área da atividade construtiva pela área de preservação, e demonstrou que a atividade construtiva de terraplenagem obteve uma significativa alteração do solo com 74,80%, 213,45% e 26,76% nos projetos A, B e C, respectivamente, corroborado por Lehmann (2023), que apontou que os processos das concepções dos projetos urbanos foram frequentemente baseados em intuições, suposições e preferências pessoais, e não se preocuparam com as alterações do solo.

As causas da **PSOLO** foram potencializadas pela quantidade de material e pela área total da obra, que contribuíram negativamente com o meio ambiente, em consonância com Cao *et al.* (2018) que narraram que os incidentes ambientais das substâncias tóxicas causaram desastres ambientais. No impacto **PA,** foram identificados dois fatores principais: as precipitações locais das regiões e a supressão total da vegetação prevista no plano de construção. Guerin (2014) publicou que as contaminações dos produtos escoados no terreno representaram um risco à segurança e contribuíram para a poluição do lençol freático.

O **URMP** teve como fatores causais, o tipo do material empregado e o seu coeficiente de impacto ambiental que foi estipulado pelo inventário do ciclo de vida do material. Esses fatores corroboram com Muthukannan; Sankar; Ganesh (2018) que apontaram a ocorrência de poluição ambiental desde a extração das matérias-primas até o empacotamento final dos materiais. Vários estudos interligaram as causas da geração de resíduos com as inadequações dos projetos Bossink; Brouwers (1996); Gangolells *et al.* (2014); Llatas (2011); Marrero (2011), e aos métodos construtivos que foram definidos nos procedimentos operacionais das atividades construtivas (Kim *et al.,* 2006). As atividades de terraplenagem (movimentação de terra) motivaram diretamente os resultados elevados das quantidades de bota-fora de solo gerando resíduos de construção, entretando, a racionalização dos projetos de terraplenagem forneceu oportunidades de redução dos **RCD**.

Para o **UA,** a causa foi a intensidade de água na produção dos elementos construtivos e os volumes de águas empregadas nos serviços de terraplenagem, corroborando com Bardhan (2011) que identificou os materiais de construção como os grandes consumidores de água em seus processos de fabricação. Para o **UE**, os fatores causais observados foram a energia embutida na produção dos materiais e o consumo energético relativo ao transporte de cargas, discordando de Vanek (2002) que afirmou que o consumo de energia do transporte teve menor impacto do que o componente de fabricação dos produtos. A Tabela 1, apresenta as quantificações dos impactos.

DESCRIÇÃO DAS ATIVIDADES	Unid.	QUANTIDADE DO SERVIÇO			PARTÍCULAS TOTAIS EM SUSPENSÃO (PTS) (g)			EMISSÕES DE GASES DO EFEITO ESTUFA (GGE) ($KgCO_2e$)			POLUIÇÃO SONORA (PS) (dB)		
		Projeto A	Projeto B	Projeto C	Projeto A	Projeto B	Projeto C	Projeto A	Projeto B	Projeto C	Projeto A	Projeto B	Projeto C
TERRAPLENAGEM	m²	191.461,24	20.340,32	104.399,08	3.092.263,15	161.764,65	1.458.627,49	279.157,83	26.346,32	129.269,90	70,86	67,74	76,76
DRENAGEM	m	6.698,00	967,61	1.575,53	53.846,90	5.612,17	14.697,19	384.395,35	55.742,66	90.294,97	61,46	58,40	67,51
SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA	m	6.698,00	5.378,00	4.976,00	5.083,54	4.041,33	3.816,60	17.477,43	14.033,09	12.984,13	61,46	58,40	67,51
SISTEMA DE ENERGIA ELÉTRICA	Unid.	222	155	130	1.587,34	955,46	1.009,94	59.801,02	41.740,63	35.005,80	61,83	58,79	67,55
PAVIMENTAÇÃO	m²	53.243,18	31.878,00	39.138,85	262.144,07	19.846,06	184.115,51	143.261,11	83.192,48	101.176,61	54,06	51,06	60,11
MEIO-FIO	m	13.590,00	9.278,00	11.393,96	23.640,40	1.913,93	19.123,43	372.501,98	254.042,21	311.879,34	51,05	48,05	57,10

DESCRIÇÃO DAS ATIVIDADES	Unid.	QUANTIDADE DO SERVIÇO			ALTERAÇÃO DO SOLO (AS) (%)			POLUIÇÃO DO SOLO (PSOLO) (mg/m^2)			POLUIÇÃO DA ÁGUA (PA) (%)		
		Projeto A	Projeto B	Projeto C	Projeto A	Projeto B	Projeto C	Projeto A	Projeto B	Projeto C	Projeto A	Projeto B	Projeto C
TERRAPLENAGEM	m²	191.461,24	20.340,32	104.399,08	74,80	213,45	26,76	0,00	0,00	0,00	3,59	16,71	7,68
DRENAGEM	m	6.698,00	967,61	1.575,53	8,94	3,75	0,76	718,03	163,78	121,88	0,625	0,428	0,318
SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA	m	6.698,00	5.378,00	4.976,00	3,72	8,68	1,00	0,00	0,00	0,00	0,179	0,679	0,287
SISTEMA DE ENERGIA ELÉTRICA	Unid.	222	155	130	0,13	0,27	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PAVIMENTAÇÃO	m²	53.243,18	31.878,00	39.138,85	74,00	128,57	19,69	0,00	0,00	0,00	3,55	10,07	5,65
MEIO-FIO	m	13.590,00	9.278,00	11.393,96	5,67	11,22	1,72	695,81	750,05	420,97	0,272	0,879	0,493

DESCRIÇÃO DAS ATIVIDADES	Unid.	QUANTIDADE DO SERVIÇO			USO DE RECURSO E MATÉRIA PRIMA (URMP) (total impact)			RESÍDUO (RCD) (t)		
		Projeto A	Projeto B	Projeto C	Projeto A	Projeto B	Projeto C	Projeto A	Projeto B	Projeto C
TERRAPLENAGEM	m²	191.461,24	20.340,32	104.399,08	0,00	0,00	0,00	69.677,15	3.145,89	6.831,65
DRENAGEM	m	6.698,00	967,61	1.575,53	$7,147 \times 10^{-9}$	$1,03248 \times 10^{-9}$	$1,6811 \times 10^{-9}$	30,96	4,47	7,28
SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA	m	6.698,00	5.378,00	4.976,00	$5,345 \times 10^{-10}$	$4,27926 \times 10^{-10}$	$3,9594 \times 10^{-10}$	0,18	0,15	0,14
SISTEMA DE ENERGIA ELÉTRICA	Unid.	222	155	130	$4,759 \times 10^{-10}$	$3,32309 \times 10^{-10}$	$2,7871 \times 10^{-10}$	0,00	0,00	0,00
PAVIMENTAÇÃO	m²	53.243,18	31.878,00	39.138,85	$5,491 \times 10^{-7}$	$3,28726 \times 10^{-7}$	$4,036 \times 10^{-7}$	816,28	488,72	600,05
MEIO-FIO	m	13.590,00	9.278,00	11.393,96	$6,926 \times 10^{-9}$	$4,72834 \times 10^{-9}$	$5,8067 \times 10^{-9}$	30,01	20,49	25,16

DESCRIÇÃO DAS ATIVIDADES	Unid.	QUANTIDADE DO SERVIÇO			USO DA ÁGUA (UA) (L)			USO DE ENERGIA (UE) (Mj)		
		Projeto A	Projeto B	Projeto C	Projeto A	Projeto B	Projeto C	Projeto A	Projeto B	Projeto C
TERRAPLENAGEM	m²	191.461,24	20.340,32	104.399,08	161.454,06	137.077,92	159.603,81	3.241.499,60	326.737,67	1.607.567,88
DRENAGEM	m	6.698,00	967,61	1.575,53	112.191,25	16.207,50	26.390,00	3.327.247,19	479.974,74	815.138,25
SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA	m	6.698,00	5.378,00	4.976,00	0,00	0,00	0,00	661.203,93	530.671,75	491.192,65
SISTEMA DE ENERGIA ELÉTRICA	Unid.	222	155	130	17.575,00	12.270,83	10.291,67	543.881,90	379.190,02	317.890,53
PAVIMENTAÇÃO	m²	53.243,18	31.878,00	39.138,85	632.684,42	374.757,77	460.116,31	687.586,83	484.889,38	456.888,81
MEIO-FIO	m	13.590,00	9.278,00	11.393,96	108.720,00	74.223,75	91.151,25	3.224.118,26	2.198.078,92	2.815.493,39

Tabela 1: Quantificações Absolutas dos Dez Impactos Ambientais.
Fonte: Os autores (2025).

4.2. INVENTÁRIO

Os resultados foram transformados em um escala unitária para comparar os impactos ambientais dos três estudos de casos selecionados e validar a metodologia. A comparação dos três projetos e seus resultados divergentes apontou que a **PTS** do projeto B foi menor do que as encontradas nos projetos A e C. O **RCD** do projeto A foi maior do que os valores obtidos no projeto B e C. Já a **PA**, **PSOLO** e **AS** do projeto B foi maior do que os resultados obtidos nos demais. Os resultados apresentados mostraram oito impactos ambientais máximos para projeto B (**PTS**; **EU**; **UA**; **RCD**; **URMP**; **GEE**; **PS**); sete para o projeto A (**EU**; **UA**; **RCD**; **URMP**; **GEE**; **PS**) e seis para o projeto C (**UA**; **UE**; **PTS**; **GEE**; **PS**; **URMP**) demonstrando a flexibilidade da aplicação da metodologia para obra similares (Figura 1).

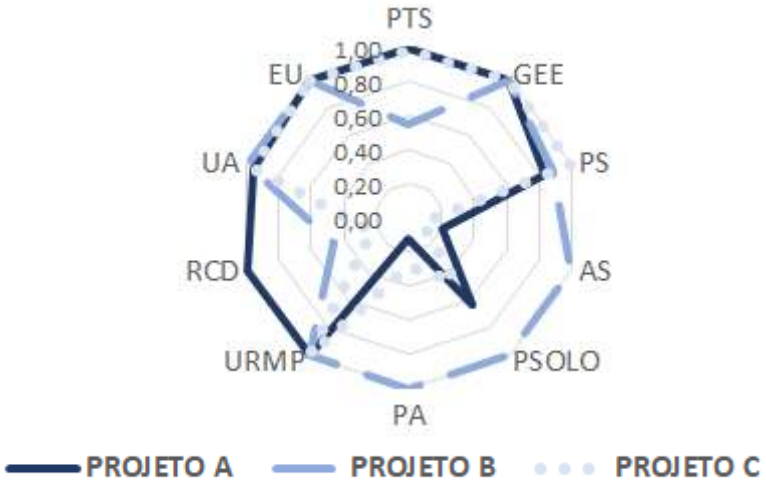

Figura 1: Impactos Ambientais Unitários.
Nota: PTS (Partículas Totais em Suspensão), GEE (Gases do Efeito Estufa), PS (Poluição Sonora), AS (Alteração do Solo), PSOLO (Poluição do Solo), PA (Poluição das Águas), URMP (Uso de Recurso e Matéria-Prima), RCD (Resíduo da Construção e Demolição), UA (Uso de Água) e EU (Uso de Energia).
Fonte: Os autores (2025).

As medidas descritivas do inventário para o impacto ambiental **PTS** apresentaram nas atividades construtivas sistema de drenagem pluvial, sistema de abastecimento de água e sistema de energia elétrica resultados dentro da faixa extremamente aceitável, com os seguintes valores do coeficiente de variação de 23,11%, 1,02% e 11,51%. A atividade de terraplenagem apresentou o coeficiente de variação de 33,46% e ficou na faixa aceitável. As atividades de pavimentação e meio fio obtiveram coeficiente de variação na ordem de 70,90% e 71,86% e ficaram na faixa pouco aceitável. Os resultados dos coeficientes de variações para o impacto ambiental **GEE** foram extremamente aceitáveis, com terraplenagem obtendo o maior valor (8,57%) e sistema de abastecimento de água com o valor de zero por cento (0%).

Todos os resultados das medidas de dispersão da **PS** para as seis atividades atingiram a faixa de extremamente aceitável. Para a **AS**, a terraplenagem atingiu a faixa inaceitável com 158,13%, e as demais atividades entre 91,92% e 93,03% que as incluíram na faixa de pouco aceitável. Os resultados do impacto ambiental **PSOLO** foram calculados para duas atividades: sistema de drenagem pluvial e meio fio com 39,75% em ambas. Os resultados das médias para a formulação do inventário para **URMP** e para **UE** foram extremamente aceitáveis diante do coeficiente de variação entre 0% e 13,53%. Os impactos ambientais **RCD** e **UA** obtiveram na atividade de terraplenagem a faixa pouco aceitável e inaceitável com 78,70% e 106,17%, respectivamente e, nas demais atividades construtivas, a faixa extremamente aceitável. O impacto ambiental **PA** atingiu a faixa inaceitável para atividade de terraplenagem (147,23%) e, nas outras cinco atividades construtivas, a faixa pouco aceitável com resultados entre 72,54% e 72,66% (Tabela 2).

DESCRIÇÃO DAS ATIVIDADES	Unit	Partículas Totais em Supensão (PTS) (g)			Emissão de Gases do Efeito Estufa (GEE) ($KgCO_2e$)			Poluição Sonora (PS) (dB)			Alteração do Solo (AS) (%)			Poluição do Solo (PSOLO) (mg/m^2)		
		Média	DP	C. V.	Média	DP	C. V.	Média	DP	C. V.	Média	DP	C. V.	Média	DP	C. V.
TERRAPLENAGEM	m³	$1,27 \times 10^{1}$	4,25	33,46	$1,33 \times 10^{0}$	0,11	8,57	$1,48 \times 10^{1}$	1,23	8,29	$3,71 \times 10^{-3}$	0,01	158,13	0,00	0,00	*
DRENAGEM	m	$7,72 \times 10^{0}$	1,79	23,12	$5,74 \times 10^{1}$	0,15	0,27	$1,89 \times 10^{1}$	2,59	13,68	$1,90 \times 10^{-3}$	0,00	93,03	$1,18 \times 10^{-1}$	0,05	39,75
SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA	m	$7,59 \times 10^{-1}$	0,01	1,02	$2,61 \times 10^{0}$	0,00	0,00	$1,67 \times 10^{1}$	1,40	8,42	$7,90 \times 10^{-4}$	0,00	93,01	0,00	0,00	*
SISTEMA DE ENERGIA ELÉTRICA	unit	$7,03 \times 10^{0}$	0,81	11,51	$2,69 \times 10^{2}$	0,05	0,02	$2,84 \times 10^{1}$	3,10	10,93	$8,57 \times 10^{-4}$	0,00	91,92	0,00	0,00	*
PAVIMENTAÇÃO	m²	$3,42 \times 10^{0}$	2,42	70,90	$2,63 \times 10^{0}$	0,06	2,10	$1,20 \times 10^{1}$	0,98	8,22	$1,98 \times 10^{-3}$	0,00	92,97	0,00	0,00	*
MEIO-FIO	m	$1,21\times 10^{0}$	0,87	71,86	$2,74 \times 10^{1}$	0,02	0,07	$1,28 \times 10^{1}$	1,07	8,34	$5,92 \times 10^{-4}$	0,00	92,92	$5,63 \times 10^{-2}$	0,02	39,75

DESCRIÇÃO DAS ATIVIDADES	Unit	Poluição da Água (PA) (%)			Uso de Recurso e Matéria Prima (URMP) (Impacto Total)			Resíduo (RCD) (t)			Uso da Água (UA) (L)			Uso de Energia (UE) (Mj)		
		Média	DP	C. V.	Média	DP	C. V.	Média	DP	C. V.	Média	DP	C. V.	Média	DP	C. V.
TERRAPLENAGEM	m³	$3,05 \times 10^{-4}$	0,00	147,23	0,00	0,00	*	$1,95 \times 10^{-1}$	0,15	78,70	$3,04 \times 10^{0}$	3,22	106,17	$1,61 \times 10^{1}$	0,77	4,76
DRENAGEM	m	$2,46 \times 10^{-4}$	0,00	72,66	$1,07 \times 10^{-12}$	0,00	0,00	$4,62 \times 10^{-3}$	0,00	0,03	$1,67 \times 10^{1}$	0,00	0,00	$5,03 \times 10^{2}$	12,12	2,41
SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA	m	$7,02 \times 10^{-5}$	0,00	72,54	$7,96 \times 10^{-14}$	0,00	0,00	$2,76 \times 10^{-5}$	0,00	2,42	0,00	0,00	*	$9,87 \times 10^{1}$	0,02	0,02
SISTEMA DE ENERGIA ELÉTRICA	unit	0,00	0,00	*	$2,14 \times 10^{-12}$	0,00	0,00	0,00	0,00	*	$7,92 \times 10^{1}$	0,00	0,00	$2,45 \times 10^{3}$	2,41	0,10
PAVIMENTAÇÃO	m²	$1,76 \times 10^{-4}$	0,00	72,60	$1,03 \times 10^{-11}$	0,00	0,00	$1,53 \times 10^{-2}$	0,00	0,00	$1,18 \times 10^{1}$	0,07	0,62	$1,33 \times 10^{1}$	1,79	13,53
MEIO-FIO	m	$5,27 \times 10^{-5}$	0,00	72,60	$5,10 \times 10^{-13}$	0,00	0,00	$2,21 \times 10^{-3}$	0,00	0,01	$8,00 \times 10^{0}$	0,00	0,00	$2,40 \times 10^{2}$	5,79	2,41

Tabela 2: Inventário dos Impactos Ambientais.

Nota: *Coeficiente de variação não determinado devido a presença de média nula; DP: Desvio Padrão; CV: Coeficiente de Variação.

Fonte: Os autores (2025).

O inventário possibilitou a criação do primeiro banco de dados com base em três projetos de infraestrutura, corroborando com Kim *et al.* (2013) que desenvolveram um banco de dados de acidentes de projetos de construções de rodovias e aplicaram análise de variância e tabulação cruzada para identificar as causas.

4.3. IDENTIFICAÇÃO DAS CAUSAS

O diagrama de causa e efeito *(Ishikawa)* auxiliou na organização das causas. O problema a ser solucionado foi inserido na extremidade da seta (cabeça) e quatro categorias foram distribuídas na parte superior das setas diagonais (espinhas) e apontadas as causas de cada categoria (Figura 2).

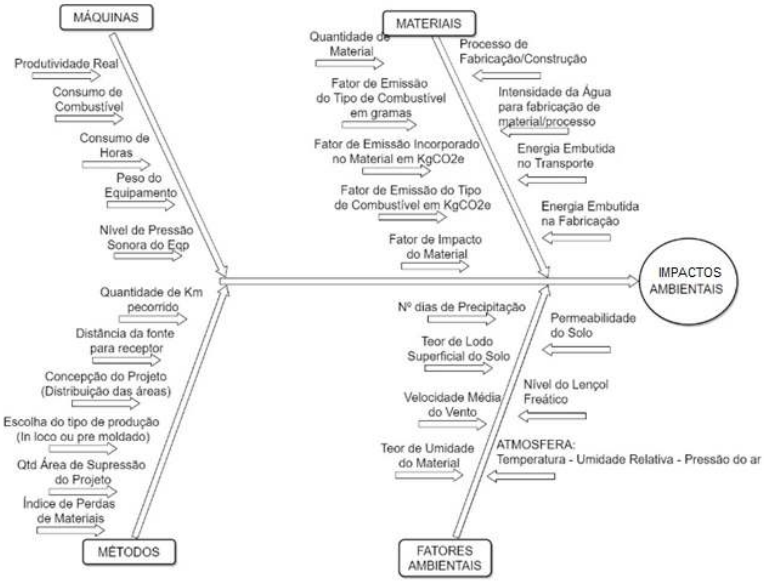

Figura 2: Diagrama de Causa e Efeito dos Impactos Ambientais.
Fonte: Os autores (2025).

O diagrama de causa e efeito demonstrou uma sinergia das máquinas, métodos, materiais e fatores ambientais nas quantificações dos dez impactos ambientais.

As categorias de máquinas e métodos evidenciaram impactos importantes na gestão das obras. A categoria materiais tiveram consequências importantes, devido aos mecanismos de produção, que interferiram nos fatores de emissões do tipo do combustível, nos fatores de emissões incorporadas nos materiais, nos fatores de impactos, nas intensidades de uso de água incorporada na produção, no consumo de energia embutida na fabricação, no processo de construção e na quantidade de material, corroborando com Beckford (2002) que considerou a categoria de materiais como uma das principais e apropriadas ao diagrama de *Ishikawa*.

Em relação à categoria de fatores ambientais, os dias de precipitação, o teor de lodo superficial do solo, a velocidade média do vento, o teor de umidade do material, a permeabilidade do solo, o nível do lençol freático e a atmosfera (temperatura, umidade e pressão do ar) fomentaram as variações das partículas totais em suspensão, da poluição do solo e da poluição das águas, conforme Fuertes *et al.* (2013) que relataram a interação do local de trabalho aos impactos ambientais.

5. CONCLUSÕES

Neste estudo foi apresentada uma metodologia para quantificar e identificar as causas dos impactos ambientais dos projetos de infraestrutura urbana durante a fase de pré-construção. O método calculou e identificou as causas de dez impactos ambientais em seis atividades construtivas de forma objetiva, além da aplicação do método em três projetos de infraestrutura urbana de forma objetiva e sem a dependência de julgamento das partes interessadas no projeto. A vantagem principal da metodologia foi a elaboração da estrutura sistemática para quantificar, identificar as causas e desenvolver um inventário ambiental dos impactos ambientais específico para os três projetos em questão.

A atividade de terraplenagem obteve pontuação máxima em cinco impactos ambientais: **PTS**, **PS**, **AS**, **PA** e **RCD**, sendo classificada como a atividade de maior potencial de degradação ambiental.

Já a atividade de sistema de energia elétrica alcançou pontuações mínimas em sete impactos ambientais: **PTS**, **AS**, **PSOLO**, **PA**, **URMP**, **RCD** e **UE**, representando a atividade com menor impacto ambiental. Este estudo revelou a importância da compreensão dos impactos ambientais nas dimensões quantitativas e qualitativas na fase de projetos. Esta pesquisa criou a possibilidade para futuros avanços para desenvolver uma base de dados com informações na *web* de fácil acesso, bem como avaliar impactos ambientais de forma rápida e precisa, promovendo conhecimentos para as comunidades científica, política e empresarial.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAÚJO, A. G. de *et al.* Methodology for Quantification and Identification of Environmental Aspect in Urban Infrastructure Projects in the Planning Phase. **Buildings**, [*s. l.*], v. 15, n. 8, 2025.

ARAÚJO, A. G. de; CARNEIRO, A. M. P.; PALHA, R. P. Predictive methodology for the quantification of environmental aspects in urban infrastructures. **Sustainability** (Switzerland), [*s. l.*], v. 12, n. 18, 2020a.

ARAÚJO, A. G. de; CARNEIRO, A. M. P.; PALHA, R. P. Sustainable construction management: A systematic review of the literature with meta-analysis. **Journal of Cleaner Production**, [*s. l.*], v. 256, p. 120350, 2020b.

AROGUNDADE, S.; DULAIMI, M.; AJAYI, S. Holistic Review of Construction Process Carbon-Reduction Measures: A Systematic Literature Review Approach. **Buildings**, [*s. l.*], v. 13, n. 7, 2023.

BARDHAN, S. Assessment of water resource consumption in building construction in India. **WIT Transactions on Ecology and the Environment**, [*s. l.*], v. 144, p. 93–101, 2011.

BECKFORD, J. **Quality**. Seconded. London, UK: Tayllor & Francis Group, 2002.

BOSSINK, B. A. G.; BROUWERS, H. J. H. CONSTRUCTION WASTE: QUANTIFICATION AND SOURCE EVALUATION. **Journal of Construction Engineering and Management**, [*s. l.*], v. 55, p. 1–6, 1996.

CAO, G. *et al.* Environmental incidents in China: Lessons from 2006 to 2015. **Science of the Total Environment**, [*s. l.*], v. 633, p. 1165–1172, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.271.

CARTER, C. R.; ROGERS, D. S. **A framework of sustainable supply chain management:** Moving toward new theory. [*S. l.: s. n.*], 2008-. ISSN 09600035.v. 38

CASANELLES-ABELLA, J. *et al.* Applying predictive models to study the ecological properties of urban ecosystems: A case study in Zürich, Switzerland. **Landscape and Urban Planning**, [*s. l.*], v. 214, n. May, p. 104137, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2021.104137.

CHEN, Z.; LI, H.; WONG, C. T. C. EvironalPlanning : Analytic Network Process Model for Environmentally Conscious Construction Planning. **Journal of Construction Engineering and Management**, [*s. l.*], v. 131, n. 1, p. 92–101, 2005.

DET UDOMSAP, A.; HALLINGER, P. A bibliometric review of research on sustainable construction, 1994–2018. **Journal of Cleaner Production**, [*s. l.*], v. 254, p. 120073, 2020.

FEDOROVA, A. *et al.* A testing methodology for quantification of wind-driven rain intrusion for building-integrated photovoltaic systems. **Building and Environment**, [*s. l.*], v. 199, n. February, 2021.

FREDRIKSSON, A.; NOLZ, P. C.; SERAGIOTTO, C. A mixed method evaluation of economic and environmental considerations in construction transport planning: The case of Ostlänken. **Sustainable Cities and Society**, [*s. l.*], v. 69, n. November 2020, 2021.

FUERTES, A. *et al.* An Environmental Impact Causal Model for improving the environmental performance of construction processes. **Journal of Cleaner Production**, [*s. l.*], v. 52, p. 425–437, 2013. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.02.005.

GANGOLELLS, M. *et al.* Analysis of the implementation of effective waste management practices in construction projects and sites. **Resources, Conservation and Recycling**, [*s. l.*], v. 93, p. 99–111, 2014.

GUERIN, T. Understanding Causes of Leaking Plant and Equipment on Construction Sites That Can Lead to Soil and Groundwater Contamination. **Remediation**, [*s. l.*], v. 25, n. 1, p. 115–131, 2014.

HATEFI, S. M.; TAMOŠAITIENE, J. Construction projects assessment based on the sustainable development criteria by an integrated fuzzy AHP and improved GRA model. **Sustainability** (Switzerland), [*s. l.*], v. 10, n. 4, p. 1–14, 2018.

HOPFE, C. J.; MCLEOD, R. S. Enhancing resilient community decision-making using building performance simulation. **Building and Environment**, [*s. l.*], v. 188, p. 107398, 2021.

KABIR, Z.; MORGAN, R. K. Strategic environmental assessment of urban plans in New Zealand: current practice and future directions. **Journal of Environmental Planning and Management**, [*s. l.*], v. 0, n. 0, p. 1–24, 2020.

KENNEDY, C.; ZHONG, M.; CORFEE-MORLOT, J. Infrastructure for China's Ecologically Balanced Civilization. **Engineering**, [*s. l.*], v. 2, n. 4, p. 414–425, 2016.

KIM, J. H. *et al.* Development of the construction waste management performance evaluation tool (WMPET). *In*: , 2006. **2006 Proceedings of the 23rd International Symposium on Robotics and Automation in Construction, ISARC 2006**. [*S. l.: s. n.*], 2006. p. 263–268.

KIM, Y. A. *et al.* Major Accident Factors for Effective Safety Management of Highway Construction Projects. **Journal of Construction Engineering and Management**, [*s. l.*], v. 139, n. 6, p. 628–640, 2013.

LEHMANN, S. **Research Methods in Urban Design: A Framework for Researching the Performance and Resilience of Places †**. [*S. l.*]: MDPI, 2023.

LI, H.; WANG, C. The Construction of Green Building Integrated Evaluation System Based on BIM Technology. **Mobile Information Systems**, [*s. l.*], v. 2022, 2022.

LLATAS, C. A model for quantifying construction waste in projects according to the European waste list. **Waste Management**, [*s. l.*], v. 31, n. 6, p. 1261–1276, 2011. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2011.01.023.

MARRERO, M. Demolition Waste Management in Spanish Legislation. **The Open Construction and Building Technology Journal**, [*s. l.*], v. 5, n. 1, p. 162–173, 2011.

MUTHUKANNAN, M.; SANKAR, A.; GANESH, C. THE ENVIRONMENTAL IMPACT CAUSED BY THE CERAMIC INDUSTRIES AND ASSESSMENT METHODOLOGIES. **International Journal for Quality Research**, [*s. l.*], v. 13, n. 2, p. 315–334, 2018.

ORTIZ, O.; CASTELLS, F.; SONNEMANN, G. Sustainability in the construction industry: A review of recent developments based on LCA. **Construction and Building Materials**, [*s. l.*], v. 23, n. 1, p. 28–39, 2009.

OSMANI, M.; GLASS, J.; PRICE, A. D. F. Architects' perspectives on construction waste reduction by design. **Waste Management**, [*s. l.*], v. 28, n. 7, p. 1147–1158, 2008.

SOLÍS-GUZMÁN, J. *et al.* A Spanish model for quantification and management of construction waste. **Waste Management**, [*s. l.*], v. 29, n. 9, p. 2542–2548, 2009. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2009.05.009.

THOMÉ, A. M. T. *et al.* Sustainable infrastructure: A review and a research agenda. **Journal of Environmental Management**, [*s. l.*], v. 184, p. 143–156, 2016.

VANEK, F. M. The sector-stream matrix: Introducing a new framework for the analysis of environmental performance. **Sustainable Development**, [*s. l.*], v. 10, n. 1, p. 12–24, 2002.

VILLORIA SÁEZ, P.; DEL RÍO MERINO, M.; PORRAS-AMORES, C. Estimation of construction and demolition waste volume generation in new residential buildings in Spain. **Waste Management and Research**, [*s. l.*], v. 30, n. 2, p. 137–146, 2012.

ZHANG, J. *et al.* Understanding the impact of environmental regulations on green technology innovation efficiency in the construction industry. **Sustainable Cities and Society**, [*s. l.*], v. 65, n. June 2020, 2021.