

1	Índice	
2	Introducción.....	3
3	Consideraciones regulatorias y de política pública	5
4	Sistemas béticos	5
5	Estatus	5
6	Especies clave	6
7	Metas y objetivos.....	6
8	Eventos extremos recurrentes y otros factores de estrés e impactos	6
9	Actividades clave	7
10	Arrecifes de coral	8
11	Estatus	8
12	Especies clave	8
13	Metas y objetivos.....	8
14	Eventos extremos recurrentes y otros factores de estrés e impactos	9
15	Actividades clave	9
16	Yerbas marinas.....	10
17	Estatus	10
18	Especies clave	10
19	Metas y objetivos.....	11
20	Eventos extremos recurrentes y otros factores de estrés e impactos	11
21	Actividades clave	11
22	Ecosistemas de playa.....	12
23	Estatus	12
24	Especies clave	13
25	Metas y objetivos.....	13
26	Eventos extremos recurrentes y otros factores de estrés e impactos	13
27	Actividades clave	14
28	Manglares.....	15
29	Estatus	15
30	Especies clave	15
31	Metas y objetivos.....	16
32	Eventos extremos recurrentes y otros factores de estrés e impactos	16
33	Actividades clave	17
34	Bosques urbanos de tierras altas	17
35	Estatus	17
36	Especies clave	18

37	Metas y objetivos.....	18
38	Eventos extremos recurrentes y otros factores de estrés e impactos	18
39	Actividades clave	18
40	Monitoreo de respuesta del hábitat.....	19
41	Referencias.....	21
42		
43		

44 **Introducción**

45 El Estuario de la Bahía de San Juan (EBSJ) es un ecosistema costero vital que sustenta una gran diversidad de
46 hábitats, incluyendo sistemas bénticos, arrecifes de coral, praderas de yerbas marinas, ecosistemas de
47 playa, manglares y bosques urbanos en la porción terrestre. Estos hábitats proveen servicios ecosistémicos
48 esenciales, tales como áreas de crianza para peces, protección costera, filtración de agua y apoyo a los
49 diferentes niveles de la biodiversidad. Sin embargo, el EBSJ enfrenta importantes desafíos ambientales
50 impulsados por la urbanización, el exceso de cargas de nutrientes, la sedimentación, las alteraciones
51 hidrológicas y los eventos climáticos extremos. El EBSJ está altamente urbanizado y, en muchas áreas, las
52 condiciones históricas de sus hábitats han sido alteradas de manera irreversible por el desarrollo y por la
53 entrada continua de contaminantes. Aunque quizá no sea factible restaurarlo a las condiciones previas a los
54 impactos por el desarrollo urbano de su cuenca, el objetivo de esta estrategia es restaurar y sostener
55 hábitats funcionales que provean servicios ecosistémicos críticos, aun dentro de un entorno urbano.

56 Además, las especies no nativas, como los caimanes (*Caiman crocodilus*), la iguana verde o gallina de palo
57 (*Iguana iguana*), el pez león (*Pterois sp.*) y el pez pleco (*Hypostomus plecostomus*), entre otros, pueden afectar
58 la viabilidad de las especies nativas y tener efectos en la salud pública. Aunque este plan no aborda el
59 manejo de especies no nativas, varias agencias prestan este servicio. La Administración Nacional Oceánica y
60 Atmosférica (NOAA, por sus siglas en inglés) maneja especies no nativas en Puerto Rico mediante planes
61 pesqueros y monitoreo marino. El Departamento de Recursos Naturales y Ambientales (DRNA) maneja los
62 permisos de importación para especies específicas y cuenta con una estrategia para rastrear y manejar
63 especies no nativas introducidas. El Servicio de Pesca y Vida Silvestre de los Estados Unidos (USFWS, por sus
64 siglas en inglés) trabaja junto con el DRNA en estos esfuerzos de manejo.

65 Esta Estrategia de Hábitats responde directamente a los asuntos relacionados con hábitats y ecosistemas
66 identificados en el plan de acción titulado *Asegurar ecosistemas funcionales* del Plan del Estuario, que enfatiza
67 la protección, restauración y resiliencia a largo plazo de los sistemas costeros y urbanos interconectados del
68 EBSJ. Esta estrategia se enfoca en los hábitats priorizados en el plan de acción, incluyendo sistemas
69 bénticos, manglares, praderas de yerbas marinas, arrecifes de coral, corredores ribereños, ecosistemas de
70 playa y bosques urbanos de tierras altas, todos los cuales sostienen funciones ecológicas importantes y
71 especies clave en el estuario. Entre estas especies clave se encuentran numerosas especies de fauna y flora
72 raras, amenazadas, endémicas y en peligro de extinción. Al alinear los esfuerzos de restauración y
73 protección de hábitats con estas prioridades, esta estrategia atiende los principales factores de estrés que
74 afectan el sistema estuarino, incluyendo la pérdida y fragmentación de hábitat, la hidrología alterada, la
75 sedimentación, la contaminación, el desarrollo urbano y los efectos de eventos climáticos extremos.

76 En respuesta a la degradación de hábitats y al deterioro de la calidad del agua, los esfuerzos de
77 restauración y manejo han aumentado en años recientes. La comunidad del EBSJ está aplicando enfoques
78 coordinados, basados en la ciencia, para conservar y restaurar hábitats críticos. Los proyectos de
79 restauración en el EBSJ incluyen la siembra de yerbas marinas, la creación de hábitats de crianza (viveros)
80 para peces y crustáceos, la siembra de mangles, la instalación de arrecifes artificiales y la estabilización de
81 costas, con el apoyo de socios locales, estatales y federales. Lograr hábitats funcionales requerirá priorizar
82 estratégicamente los sitios con el mayor rendimiento ecológico, implementar infraestructura verde y azul
83 para reducir los factores de estrés, crear y proteger refugios de hábitat y conectividad, y establecer un
84 marco de manejo adaptativo con métricas claras de desempeño y monitoreo a largo plazo.

85 Esta Estrategia de Hábitats tiene el propósito de apoyar la implementación del plan de acción titulado
86 *Asegurar ecosistemas funcionales* del Plan del Estuario y no constituye un documento independiente. En
87 particular, la Estrategia permite adelantar las prioridades de hábitats y ecosistemas establecidos bajo el
88 plan de acción, al proveer un marco para la protección, restauración y custodia de los principales hábitats
89 del sistema del EBSJ. La Estrategia traduce las metas más amplias del Plan en metas, objetivos y actividades
90 específicas para cada hábitat, a la vez que identifica socios clave, posibles costos y fuentes de
91 financiamiento necesarias para orientar una acción efectiva.

92 El EBSJ enfrenta retos complejos, incluyendo los efectos acumulados del desarrollo urbano y costero, la
93 entrada continua de contaminantes, los eventos climáticos extremos y la erosión costera, lo cual complica
94 los plazos y el éxito de la restauración. Este informe destaca la importancia de un manejo adaptativo
95 basado en la resiliencia (RBM, por sus siglas en inglés), y de estrategias basadas en la ciencia que
96 reconozcan la variabilidad espacial en las condiciones de los hábitats y en su potencial de recuperación.
97 También resalta la necesidad de financiamiento sostenido, coordinación interagencial y participación
98 comunitaria para alcanzar las metas de restauración. Las alianzas comunitarias y las acciones de política
99 pública dirigidas serán esenciales para equilibrar los usos urbanos con resultados ecológicos alcanzables, y
100 para asegurar que las inversiones en restauración generen servicios ecosistémicos medibles y beneficios de
101 resiliencia tanto para la naturaleza como para las personas.

102 La comunidad del EBSJ considera que, al apoyarse en los éxitos del pasado y en la ciencia emergente, la
103 Estrategia orientará una gestión efectiva para preservar y fortalecer los valores ecológicos y económicos del
104 estuario para las generaciones presentes y futuras.

105 Según McLeod y Leslie (2009), el RBM se define como un enfoque de manejo integrado que considera todo
106 el ecosistema, incluyendo a los seres humanos, y el espectro completo de maneras en que las personas
107 utilizan la naturaleza, se benefician de ella y la valoran. La meta principal del RBM es identificar, priorizar e
108 implementar acciones de manejo que fortalezcan la resiliencia del sistema y el bienestar humano mediante
109 la protección de procesos y especies que apoyan la capacidad de un sistema para resistir factores de estrés.
110 En otras palabras, se trata de un ecosistema que mantiene y recupera su estructura y funciones frente a
111 perturbaciones y cambios (resiliencia). Estas acciones pueden incluir el control de la contaminación, la
112 sedimentación, la sobrepesca, el manejo de especies clave y la mejora de la calidad del agua (McLeod et al.,
113 2019). El RBM también incluye estrategias para desarrollar y apoyar la capacidad de las personas para
114 aprender, compartir conocimientos, innovar y ajustar respuestas e instituciones ante factores externos y
115 procesos internos cambiantes (Folke, 2016). Por lo tanto, un enfoque de RBM guiará la implementación de
116 esta Estrategia de Restauración de Hábitats del Estuario mediante las siguientes acciones de manejo,
117 comunes a todos los hábitats:

- 118 • Proteger la diversidad de especies, hábitats y grupos funcionales.
- 119 • Mantener la conectividad.
- 120 • Reducir los factores de estrés del ecosistema.
- 121 • Establecer y manejar efectivamente las áreas marinas protegidas para apoyar la resiliencia
122 estuarina.
- 123 • Incorporar indicadores sociales y ecológicos (indicadores de resiliencia) para evaluar alertas
124 tempranas, patrones de recuperación y cambios de régimen en la planificación y el monitoreo de la
125 conservación.

- 126 • Invertir en enfoques experimentales para apoyar la resiliencia.
- 127 • Implementar estrategias para fortalecer la capacidad adaptativa social y ecológica.

128 Consideraciones regulatorias y de política pública

129 La Estrategia de Hábitats reconoce que los cambios en las reglamentaciones locales, territoriales o
130 federales, incluyendo los permisos, los estándares de calidad de agua, las políticas de uso de terrenos y los
131 mecanismos de financiamiento, pueden afectar las estrategias de protección y restauración, así como los
132 costos y los plazos. Esta Estrategia contempla revisar de manera continua las reglamentaciones y la
133 orientación aplicable para reducir retrasos en los tiempos de implementación. Estuario dará seguimiento a
134 los cambios regulatorios y evaluará sus implicaciones para los proyectos y las prioridades, de modo que las
135 acciones, los plazos y las medidas de desempeño puedan ajustarse sin comprometer los resultados
136 ecológicos necesarios ni la responsabilidad fiscal requerida para lograr el éxito.

137 También es importante señalar que los usos urbanos permitidos y las metas de restauración pueden entrar
138 en conflicto, lo que podría afectar los beneficios de implementar las actividades incluidas en esta Estrategia.
139 En tal sentido, la coordinación entre los permisos de desarrollo y la restauración de hábitats es un
140 componente importante para el éxito. Los municipios de la cuenca del EBSJ desarrollan el Plan Territorial,
141 que regula el uso de terrenos, la zonificación y el desarrollo urbano. Dicho plan se prepara conforme al
142 Código Municipal de Puerto Rico (Ley Núm. 107), que requiere que cada municipio actualice sus guías de
143 desarrollo cada ocho años. Este proceso puede ayudar a establecer zonas de amortiguamiento, requisitos
144 de infraestructura verde y corredores ecológicos para apoyar la Estrategia de Restauración de Hábitats. Los
145 implementadores principales de las actividades clave identificadas en esta Estrategia deben coordinar con
146 los municipios para determinar cómo las modificaciones al Plan Territorial podrían apoyar la restauración y
147 conservación de los hábitats del EBSJ.

148 Sistemas bénticos

149 Estatus

150 Los sistemas bénticos en el EBSJ han sido estudiados extensamente, y aproximadamente la mitad de estos
151 han sido mapeados mediante tecnología de sonar de exploración lateral (*side scan sonar*) (Rivera, 2005).
152 Estos mapas han revelado hábitats diversos y ecológicamente importantes, incluyendo praderas de
153 vegetación acuática sumergida (SAV, por sus siglas en inglés), compuestas predominantemente por
154 *Halophila decipiens* y algas rojas, así como grandes bancos de bivalvos dominados por *Mytilopsis*
155 *domingensis*. Estos hábitats se encuentran en una variedad de sustratos que van desde fondos naturales no
156 perturbados hasta zonas dragadas y estructuras artificiales, lo que resalta la complejidad y variabilidad de
157 los ambientes bénticos en el estuario. Cabe destacar que la SAV tiende a ser más abundante en áreas
158 menos alteradas, mientras que los bancos de bivalvos se concentran especialmente en la laguna San José,
159 (Lugo y Bauzá Ortega, 2024, p. 33).

160 La comunidad macrofaunal béntica está dominada en gran medida por poliquetos, con más de 250 taxa
161 identificados, aunque la estructura de la comunidad se caracteriza por unas pocas especies dominantes
162 (PBS&J, 2009). La riqueza de especies y la dominancia son notablemente mayores en los canales dragados,
163 lo que indica que actividades humanas como el dragado influyen significativamente en la composición de la
164 comunidad béntica. Para evaluar estos sistemas bénticos, los investigadores utilizan un Índice Béntico que
165 considera la diversidad a nivel de familia y la sensibilidad a la contaminación. Algunos sitios considerados

166 prístinos, como la Laguna de Piñones, presentan valores bajos del índice similares a los de áreas
167 contaminadas. Esto sugiere que factores más allá de la contaminación, como el limitado intercambio de
168 agua debido a la distancia del océano, desempeñan un papel importante en la configuración de las
169 condiciones bénticas. Otros factores de estrés, como la toxicidad de los sedimentos y las perturbaciones
170 frecuentes del sustrato sedimentario, se asocian con una reducción en la diversidad béntica en ciertas
171 localidades (Lugo y Bauzá Ortega, 2024).

172 Además, la acumulación de sedimentos ricos en nutrientes crea condiciones de bajo oxígeno y
173 concentraciones elevadas de sulfuro, lo cual afecta negativamente la biodiversidad de la infauna y altera
174 procesos esenciales como el ciclo de nutrientes. Estas condiciones deterioran la función general y la
175 resiliencia del ecosistema béntico. Para atender estos asuntos, los esfuerzos de restauración se enfocan en
176 reducir las entradas de nutrientes para mejorar la calidad de los sedimentos y promover la recuperación de
177 las comunidades bénticas. También se realiza monitoreo continuo de factores ambientales como la
178 temperatura y el oxígeno disuelto para comprender mejor sus efectos sobre la resiliencia del sistema
179 béntico y orientar futuras estrategias de manejo (Lugo y Bauzá Ortega, 2024).

180 En resumen, los sistemas bénticos del EBSJ son diversos, pero enfrentan retos derivados tanto de
181 influencias no antropogénicas como antropogénicas. Aunque ciertas áreas mantienen comunidades
182 bénticas complejas, otras sufren por contaminación, toxicidad de sedimentos y perturbaciones físicas, lo
183 que subraya la necesidad de esfuerzos continuos de restauración y monitoreo para sostener estos
184 ecosistemas vitales.

185 **Especies clave**

186 Las especies clave en los sistemas bénticos incluyen poliquetos (meiofauna dominante), bivalvos (*Mytilopsis*
187 *domingensis*), cangrejos azules (*Callinectes sapidus*), ostras de mangle rojo (*Crassostrea rhizophorae*), ostras
188 planas de árbol (*Isognomon alatus*) y una diversidad de invertebrados bénticos que habitan en sustratos de
189 fango y sedimento. Entre las especies terrestres no halófitas adyacentes a las áreas bénticas se incluyen
190 *Tabebuia heterophylla* y la palma nativa *Roystonea borinquena* (Lugo y Bauzá Ortega, 2024).

191 **Metas y objetivos**

- 192 • Alcanzar y mantener una calidad de sedimento que sostenga comunidades bénticas diversas y las
- 193 funciones del ecosistema.
- 194 • Reducir las entradas de nutrientes y contaminantes provenientes de fuentes terrestres.
- 195 • Monitorear la diversidad béntica y las condiciones del sedimento para orientar el manejo
- 196 adaptativo.
- 197 • Proteger la diversidad de grupos funcionales.

198 **Eventos extremos recurrentes y otros factores de estrés e impactos**

199 Los cambios en la calidad del sedimento y en los parámetros ambientales bénticos pueden estar
200 influenciados por cambios en la temperatura del agua, cambios en los eventos de precipitación, alteración
201 de los ciclos biogeoquímicos como el del sulfuro, cambios en pH y alteraciones causadas por infraestructura
202 construida por el ser humano que afectan los patrones de circulación e intercambio de agua. Por lo tanto,
203 es importante dar seguimiento a los cambios en la composición y diversidad de especies bénticas,
204 particularmente en las comunidades infaunales y epifaunales, para entender las respuestas biológicas
205 vinculadas a las condiciones del sedimento y del hábitat béntico. Además, surgen preocupaciones

206 relacionadas con la acidificación costera en los ambientes bénticos, donde las aportaciones de nutrientes
 207 provenientes de la escorrentía pluvial y la acumulación de sedimentos terrestres elevan los niveles de
 208 sulfuro de hidrógeno, reducen la disponibilidad de oxígeno e incrementan la acidez del sedimento. Estos
 209 cambios dificultan la supervivencia y la formación de conchas en organismos bénticos dependientes del
 210 carbonato de calcio. Se necesita más investigación para comprender mejor los efectos de la acidificación en
 211 los sedimentos bénticos y la resiliencia biológica de las especies constructoras de concha.

212 **Actividades clave**

Actividad	Métricas	Hitos	Partes interesadas y socios responsables	Cronograma	Costos estimados	Posibles fuentes de financiamiento
1. Con base en los resultados del monitoreo, desarrollar proyectos que incluyan esfuerzos de restauración de sedimentos, remoción dirigida de sedimentos contaminados y mejoras en la calidad del hábitat béntico en el estuario.	Evaluar los cambios en los hábitats bénticos como resultado de los proyectos de restauración.	Realizar evaluaciones para identificar y priorizar las localidades en el EBSJ que requieran restauración y remoción de sedimentos contaminados según su importancia ecológica y la calidad actual del hábitat.	Principal: DRNA Socios implementadores: municipios, academia, grupos comunitarios, Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos (USACE)	5+ años	\$350,000	Agencia de Protección Ambiental de EE. UU. (USEPA), DRNA, municipios, USACE, academia
2. Monitorear y manejar la calidad de los sedimentos para reducir la toxicidad y las perturbaciones que afectan negativamente la biodiversidad béntica y las funciones del ecosistema.	Reducir los niveles de contaminantes en los sedimentos del EBSJ.	Desarrollar e implementar estrategias de manejo dirigidas a reducir la toxicidad y las perturbaciones, tales como medidas de control en la fuente, remediación de sedimentos o restauración de hábitats.	Principales: DRNA, Estuario Socios implementadores: municipios, academia, grupos comunitarios	0-2 años	Por determinar según las estrategias y el monitoreo necesarios	USEPA, DRNA, municipios
3. Apoyar los esfuerzos de restauración dirigidos a fortalecer la complejidad y resiliencia del hábitat béntico mediante la recuperación de la vegetación acuática sumergida y especies clave bénticas.	Aumentar la vegetación acuática sumergida y bancos de ostras nativas.	Identificar áreas específicas en el EBSJ donde la vegetación acuática sumergida y especies clave bénticas hayan sido degradadas o perdidas, priorizando esos sitios para esfuerzos de restauración.	Principales: DRNA, Estuario Socios implementadores: municipios, academia, grupos comunitarios	3-5 años	\$500,000	USEPA, DRNA, municipios

213 Arrecifes de coral

214 Estatus

215 El EBSJ contiene una “cadena fragmentada de arrecifes poco desarrollados” ubicada mayormente a una
216 milla mar afuera, que se extiende hacia el este desde San Juan hasta Punta Vacía Talega (Kaye, 1959). Estos
217 arrecifes consisten en colonias de coral que crecen sobre una plataforma somera de eolianita (roca
218 sedimentaria compuesta por granos de arena y carbonato de calcio consolidados y cementados) . Los
219 corales de franja, como los del EBSJ, en condición saludable pueden atenuar hasta un 97 % de la energía de
220 las olas (Ferrario et al., 2014).

221 Las comunidades de coral son más prominentes en la Laguna del Condado y, además, a lo largo de la costa
222 mar afuera desde Cataño hasta Loíza (Rodríguez et al., 1992). Dentro de esta cadena arrecifal se encuentra
223 la reserva marina Arrecife, que alberga corales constructores de arrecife amenazados, incluyendo *Acropora*
224 *palmata* y *Orbicella annularis* (Lugo y Bauzá Ortega, 2024).

225 Los corales en el EBSJ crecen mejor bajo aguas transparentes, con corrientes fuertes y condiciones estables
226 de temperatura, salinidad y bajos nutrientes. Se ven afectados por fluctuaciones en salinidad y temperatura,
227 enriquecimiento de nutrientes, deposición de sedimentos que reduce la claridad del agua y enfermedades
228 coralinas que producen pérdida de tejido. Estas condiciones de estrés son más pronunciadas dentro de las
229 lagunas en comparación con las aguas del océano Atlántico mar afuera (Lugo y Bauzá Ortega, 2024).

230 Especies clave

231 Los corales constructores de arrecife *Acropora palmata* (coral cuerno de alce, ramificado) y *Orbicella*
232 *annularis* (coral estrella, masivo), ambos incluidos en la lista de especies amenazadas de la ESA, son
233 particularmente importantes en la reserva marina Arrecife. Otra especie clave importante es el erizo de mar
234 de espinas largas (*Diadema antillarum*), debido a su función en el control de algas en los arrecifes de coral y
235 a su recuperación tras la mortandad caribeña ocurrida entre 1983 y 1993.

236 Metas y objetivos

- 237 • Identificar los factores de estrés químicos, físicos y biológicos que afectan a los arrecifes de coral.
- 238 • Identificar dónde el crecimiento coralino es posible y viable.
- 239 • Monitorear la cobertura de área arrecifal y la diversidad de especies asociadas.
- 240 • Proteger y restaurar la calidad del agua para apoyar a los arrecifes de coral.
- 241 • Preservar los corales clave constructores de arrecife, incluyendo las especies amenazadas *Acropora*
242 *palmata* y *Orbicella annularis*.
- 243 • Monitorear las condiciones ambientales que afectan a los arrecifes de coral para dirigir esfuerzos de
244 manejo y recuperación, incluyendo las enfermedades coralinas de pérdida de tejido y otras.
- 245 • Conservar hábitats arrecifales críticos, especialmente en áreas protegidas como la reserva marina
246 Arrecife.
- 247 • Identificar e implementar técnicas novedosas de restauración, como el despliegue de arrecifes
248 artificiales, el cultivo de colonias de coral y su trasplante.
- 249 • Identificar grupos clave de herbívoros que puedan apoyar el reclutamiento de larvas y la
250 recuperación de los arrecifes de coral.

251

252 **Eventos extremos recurrentes y otros factores de estrés e impactos**

253 Los arrecifes de coral en el EBSJ son vulnerables al aumento de la temperatura del agua, las fluctuaciones
 254 de salinidad, enfermedades y la acidificación oceánica. Estos factores pueden causar blanqueamiento de
 255 coral, reducir las tasas de calcificación y afectar el crecimiento y la resiliencia del arrecife. Tormentas más
 256 frecuentes e intensas pueden aumentar la escorrentía de sedimentos y el daño físico a las estructuras
 257 arrecifales. Mantener una calidad de agua estable y reducir factores de estrés localizados, como el
 258 enriquecimiento de nutrientes y la sedimentación, son medidas críticas para fortalecer la resiliencia de los
 259 arrecifes de coral ante estas condiciones ambientales cambiantes.

260 **Actividades clave**

Actividad	Métricas	Hitos	Partes interesadas y socios responsables	Cronograma	Costos estimados	Posibles fuentes de financiamiento
1. Reducir las entradas de sedimentos y nutrientes para mejorar la claridad del agua y la calidad del hábitat arrecifal.	Mejorar la calidad del agua mediante mediciones de turbidez en el EBSJ.	Delinear estrategias específicas para reducir la entrada de sedimentos y nutrientes, tales como implementar mejores prácticas de manejo.	Principal: DRNA Socios implementadores: municipios, academia, grupos comunitarios	5+ años	Por determinar según los proyectos implementados	USEPA, DRNA, municipios
2. Monitorear los arrecifes de coral para detectar efectos de condiciones ambientales como temperatura, intensidad y calidad de la Luz (irradiancia) salinidad y niveles de nutrientes.	Recopilar datos de manera rutinaria para identificar tendencias a largo plazo.	Programar y llevar a cabo intervalos regulares de recopilación de datos. Analizar periódicamente los datos recopilados.	Principales: DRNA, Estuario Socios implementadores: municipios, academia	0-2 años	Por determinar según el monitoreo necesario	USEPA, DRNA
3. Proteger y manejar áreas arrecifales críticas y especies de coral amenazadas.	Aumentar las áreas arrecifales críticas, para su protección y manejo. Documentar incidencia de enfermedades de pérdida de tejido den corales.	Identificar especies clave, condiciones de hábitat y amenazas actuales en la reserva marina Arrecife.	Principales: DRNA, USFWS Socios implementadores: municipios, academia, grupos comunitarios	0-2 años	Tiempo del personal de la agencia	USEPA, DRNA, USFWS

Actividad	Métricas	Hitos	Partes interesadas y socios responsables	Cronograma	Costos estimados	Posibles fuentes de financiamiento
4. Implementar técnicas novedosas de restauración de arrecifes de coral.	Aumentar el reclutamiento de colonias de coral y la cobertura de área.	Identificar especies clave.	Principales: DRNA, Servicio de Pesca y Vida Silvestre de EE. UU. (USFWS) Socios implementadores: municipios, academia, grupos comunitarios	3-5 años	Por determinar según el tipo de práctica de restauración	USEPA, DRNA, USFWS
5. Identificar y mapear las condiciones actuales de los corales en el EBSJ.	Revisar los mapas existentes e identificar vacíos que necesiten ser evaluados.	Identificar las condiciones actuales de los corales.	Principales: DRNA, Estuario Socios implementadores: municipios, academia, grupos comunitarios	0-2 años	Por determinar según las necesidades de mapeo	USEPA, DRNA, USFWS

261 **Yerbas marinas**

262 **Estatus**

263 Las praderas de yerbas marinas constituyen una parte importante del ambiente béntico en el EBSJ,
 264 cubriendo aproximadamente 60 % de los sustratos bénticos en áreas como la Laguna del Condado (LG2
 265 Environmental Solutions and CSA Ocean Sciences, 2021). Se han documentado cinco especies de yerbas
 266 marinas, en orden de cobertura relativa: yerba de tortuga (*Thalassia testudinum*), yerba pala (*Halophila*
 267 *decipiens*), la especie no nativa de crecimiento agresivo *Halophila stipulacea*, yerba de manatí (*Syringodium*
 268 *filiforme*) y yerba de fondos someros (*Halodule wrightii*). Las macroalgas también son un componente
 269 prominente de estas praderas, y con frecuencia prosperan bajo condiciones de enriquecimiento de
 270 nutrientes, lo que puede generar competencia y desplazamiento de las yerbas marinas y afectar su
 271 abundancia (Lugo y Bauzá Ortega, 2024).

272 El crecimiento de las yerbas marinas depende en gran medida de la transparencia del agua y de bajas
 273 concentraciones de nutrientes. Cuando los cuerpos de agua se vuelven eutróficos, las macroalgas tienden a
 274 proliferar a expensas de las yerbas marinas. Además, la cobertura de yerbas marinas tiende a disminuir a
 275 mayor profundidad del agua por la reducción en la disponibilidad de luz (irradiancia), lo que resalta su
 276 sensibilidad a los cambios en la calidad y claridad del agua (Lugo y Bauzá Ortega, 2024).

277

278 **Especies clave**

279 Se han registrado cinco especies de yerbas marinas: yerba de fondos someros (*Halodule wrightii*), yerba de
 280 manatí (*Syringodium filiforme*), yerba pala (*Halophila decipiens*), yerba de tortuga (*Thalassia testudinum*) y la
 281 especie no nativa *Halophila stipulacea* (Lugo y Bauzá Ortega, 2024; LG2 Environmental Solutions and CSA
 282 Ocean Sciences, 2021). Entre las especies dependientes de las yerbas marinas se encuentran especies en

283 peligro de extinción como el manatí antillano (*Trichechus manatus*) y la tortuga verde (*Chelonia mydas*).
 284 Además de invertebrados de importancia comercial como el carrucho (*Lobatus gigas*) y la langosta espinosa
 285 caribeña (*Panulirus argus*). *Halophila stipulacea* es una especie no nativa agresiva (de origen indo-pacífico,
 286 documentada por primera vez en el Caribe frente a Granada en 2002) que está desplazando rápidamente
 287 las yerbas marinas nativas en toda la región, incluyendo Puerto Rico. Por lo tanto, es importante monitorear
 288 su propagación y sus efectos ecológicos.

289 Metas y objetivos

- 290 • Lograr y mantener la calidad del agua, del sedimento y de la luz necesaria para la recuperación y
 291 expansión de las yerbas marinas.
- 292 • Monitorear el progreso y desempeño de los proyectos de restauración.
- 293 • Desarrollar y compartir mejores prácticas para la restauración de yerbas marinas.
- 294 • Proteger la diversidad de grupos funcionales.
- 295 • Monitorear la propagación y los impactos ecológicos de especies no nativas agresivas como
 296 *Halophila stipulacea*.

297 Eventos extremos recurrentes y otros factores de estrés e impactos

298 Se anticipa que los eventos climáticos extremos y el aumento del nivel del mar influirán significativamente
 299 en la distribución, abundancia y supervivencia de las yerbas marinas en el EBSJ. Factores clave como
 300 cambios en la temperatura del agua, salinidad, pH, profundidad del agua y carga de nutrientes actúan de
 301 forma sinérgica, creando retos complejos que requieren estudio y modelaje detallado para orientar
 302 estrategias efectivas de restauración y manejo.

303 Actividades clave

Actividad	Métricas	Hitos	Partes interesadas y socios responsables	Cronograma	Costos estimados	Posibles fuentes de financiamiento
1. Desarrollar e implementar un plan de restauración de yerbas marinas para todo el EBSJ que guíe los esfuerzos de recuperación y expansión.	Aprobar el plan de restauración para las yerbas marinas en el EBSJ.	Desarrollar objetivos claros de restauración, incluyendo metas específicas para métricas de cobertura de yerbas marinas.	Principales: DRNA, Estuario Socios implementadores: municipios, academia, grupos comunitarios	3-5 años	\$100,000	USEPA, DRNA

Actividad	Métricas	Hitos	Partes interesadas y socios responsables	Cronograma	Costos estimados	Posibles fuentes de financiamiento
2. Establecer o actualizar metas de calidad de agua, incluyendo la calidad de luz óptima para el crecimiento de las yerbas marinas, así como umbrales de disponibilidad de luz, calidad del sedimento y nutrientes.	Monitorear cambios de los indicadores de calidad del agua.	Colaborar con expertos en calidad de agua y otros grupos relevantes para recopilar insumos sobre la investigación actual relacionada con parámetros de calidad de agua que apoyan el crecimiento óptimo de las yerbas marinas.	Principales: DRNA, Estuario Socios implementadores: municipios, academia	0–2 años	\$100,000	USEPA, DRNA
3. Monitorear el progreso de la restauración y compartir mejores prácticas para fortalecer los esfuerzos continuos y futuros de protección de las yerbas marinas.	Implementar mejores prácticas para potenciar el éxito de la restauración de yerbas marinas.	Compilar una guía de mejores prácticas basada en estrategias exitosas utilizadas en esfuerzos de restauración de yerbas marinas.	Principales: DRNA, Estuario Socios implementadores: municipios, academia, grupos comunitarios	0–2 años	Por determinar según el monitoreo necesario	USEPA, DRNA
4. Evaluar y monitorear los efectos ecológicos de especies no nativas y desarrollar medidas de control de ser necesario.	Limitar la expansión de especies no nativas como <i>Halophila stipulacea</i> en las praderas de yerbas marinas del EBSJ.	Compilar datos sobre los posibles efectos ecológicos de especies no nativas y desarrollar estrategias de control.	Principales: DRNA, Estuario Socios implementadores: municipios, academia, grupos comunitarios	0–2 años	Por determinar según el monitoreo necesario	DRNA, NOAA

304 Ecosistemas de playa

305 Estatus

306 El EBSJ contiene playas arenosas interconectadas con matorrales de playa y sistemas de dunas que
307 funcionan como un ecosistema costero dinámico moldeado por el viento, las olas, las mareas y las
308 corrientes marinas. Estos hábitats sostienen comunidades diversas documentadas por Cerame Vivas (2000)
309 y el DRNA (2005), y son esenciales para el almacenamiento de arena, la protección de la costa, el ciclo de
310 nutrientes y el hábitat para la fauna silvestre (Lugo y Bauzá Ortega, 2024). La energía de las olas, las
311 barreras arrecifales y los patrones estacionales de viento influyen fuertemente en si las playas acumulan o
312 pierden arena. Sin barreras arrecifales funcionales, es más probable que la arena se pierda mar afuera,
313 reduciendo el potencial de recuperación natural (Díaz Velázquez y Canals Silander, 2020; Lugo y Bauzá
314 Ortega, 2024). Acciones humanas históricas y continuas, incluyendo la extracción de arena para
315 construcción, la construcción de represas, la recolección y colocación de arena asociadas con rellenos para
316 aeropuertos y carreteras, y el desarrollo costero, han removido barreras de dunas, alterado el transporte de

317 sedimentos, elevado los niveles del suelo en manglares y facilitado el establecimiento de especies no
318 nativas o terrestres que cambian la estructura del hábitat (Lugo y Bauzá Ortega, 2024).

319 **Especies clave**

320 Las asociaciones de playas arenosas y rocosas sostienen comunidades infaunales y epifaunales diversas, y
321 son habitadas por crustáceos como los cangrejos ermitaños (*Coenobita spp.*) y el cangrejo fantasma del
322 Atlántico (*Ocypode quadrata*). La vegetación de dunas y matorrales, incluyendo uva de playa (*Coccoloba*
323 *uvifera*), bejuco de playa (*Canavalia rosea*), Bayhops (*Ipomoea pes-crapae*), Batatilla (*Ipomoea imperati*) y Ink
324 berry (*Scaevola plumieri*), entre otras plantas costeras, ayuda a estabilizar la arena, proveer
325 amortiguamiento contra el viento y producir una zonación distintiva desde la franja costera hasta los
326 matorrales interiores (Lugo y Bauzá Ortega, 2024). Estas playas respaldadas por dunas también sirven como
327 hábitat importante de anidación para tortugas marinas, especialmente la tortuga carey (*Eretmochelys*
328 *imbricata*), la tortuga verde (*Chelonia mydas*) y la tinglar o tortuga laúd (*Dermochelys coriacea*) (Cerame Vivas,
329 2000; DRNA, 2005; Lugo y Bauzá Ortega, 2024; FEMA, 2018).

330 **Metas y objetivos**

- 331 • Preservar y restaurar el ecosistema integrado de playa (playas arenosas, matorrales de playa y
332 dunas de arena) para mantener el transporte natural de arena, la estabilidad de la costa y la función
333 del hábitat.
- 334 • Proteger las especies nativas de playa, dunas y matorrales, así como la diversidad funcional que
335 representan.
- 336 • Restaurar y proteger las barreras arrecifales, las dunas sumergidas y otras características cercanas a
337 la costa que retienen arena y apoyan la recuperación natural de las playas.
- 338 • Estabilizar las dunas mediante vegetación nativa y conservar los recursos de agua dulce para
339 sostener las comunidades de dunas y prevenir la intrusión salina.
- 340 • Monitorear la morfología de la playa, la dinámica de sedimentos, la estructura de la vegetación y el
341 uso biológico del área, incluyendo la anidación de tortugas marinas, para apoyar el manejo
342 adaptativo.
- 343 • Prevenir prácticas perjudiciales, como la extracción de arena, y limitar el desarrollo que reduzca la
344 capacidad de amortiguamiento de las dunas y playas y degrade hábitats adyacentes de manglares y
345 humedales.

346 **Eventos extremos recurrentes y otros factores de estrés e impactos**

347 Las marejadas ciclónicas de alta energía y los huracanes pueden exceder los niveles normales de marea
348 alta, sobrepasar las dunas, causar erosión severa de las playas y dañar la infraestructura (Fields y Jordan,
349 1972; Lugo y Bauzá Ortega, 2024). El aumento del nivel del mar y la inundación crónica reducen el área de
350 playa, alteran las lentes de agua subterránea de las dunas y aumentan la vulnerabilidad de los matorrales y
351 otros hábitats interiores (Lugo y Bauzá Ortega, 2024). La reducción de la función arrecifal ya sea por causas
352 naturales o por pérdida antropogénica, disminuye la retención de arena cerca de la costa y aumenta la
353 probabilidad de que la arena se pierda hacia zonas mar afuera más profundas (Díaz Velázquez y Canals
354 Silander, 2020; Lugo y Bauzá Ortega, 2024). El estrés por viento y la salpicadura salina moldean la zonación
355 de los matorrales, pero también pueden limitar el reclutamiento cuando ocurren eventos extremos o
356 cambios en el suministro de sedimentos (Lugo y Bauzá Ortega, 2024).

357

Actividades clave

Actividad	Métricas	Hitos	Partes interesadas y socios responsables	Cronograma	Costos estimados	Posibles fuentes de financiamiento
1. Implementar proyectos de control de erosión, retención y aporte de arena que sean compatibles con los procesos costeros naturales, así como reducir el tránsito peatonal.	Cambios observados en la estabilidad de la línea de costa, medidos mediante tasas de erosión/acreción.	Identificar y priorizar ubicaciones específicas para medidas de control de erosión y aporte de arena basadas en la naturaleza y para reducir el impacto del tránsito peatonal.	Principal: DRNA Socios implementadores: Estuario, municipios, academia, USACE, grupos comunitarios	3-5 años	Por determinar según los proyectos seleccionados	DRNA, USEPA, USACE, municipios
2. Proteger y restaurar las barreras arrecifales mar afuera y las características de dunas sumergidas para mejorar la retención y recuperación de arena.	Área de arrecifes y dunas sumergidas protegida/restaurada.	Evaluaciones completadas sobre la funcionalidad de arrecifes y dunas sumergidas.	Principal: DRNA Socios implementadores: Estuario, academia, USACE, grupos comunitarios	5+ años	Por determinar según los proyectos seleccionados	DRNA, USEPA, USACE, municipios
3. Restaurar y estabilizar las dunas de arena utilizando vegetación nativa reproducida en el vivero del EBSJ.	Identificación de las tasas de supervivencia y crecimiento de la vegetación.	Sitios de dunas restaurados con perfiles estabilizados y cobertura de plantas nativas.	Principal: DRNA Socios implementadores: Estuario, municipios, grupos comunitarios	5+ años	Por determinar según los proyectos seleccionados	DRNA, USEPA, municipios
4. Proteger y restaurar los matorrales de playa y mantener los patrones de zonación para preservar la función de amortiguamiento contra el viento.	Área de matorral de playa protegida o restaurada.	Identificar y restaurar áreas degradadas de matorral, además de establecer monitoreo a largo plazo.	Principal: DRNA Socios implementadores: Estuario, municipios, academia, grupos comunitarios	5+ años	Por determinar según los proyectos seleccionados	DRNA, USEPA, municipios

Actividad	Métricas	Hitos	Partes interesadas y socios responsables	Cronograma	Costos estimados	Posibles fuentes de financiamiento
5. Integrar la conservación de dunas en la planificación del uso de terrenos y de los recursos de agua para prevenir la intrusión salina y apoyar la vegetación.	Inclusión de medidas de conservación de dunas en los planes de uso de terrenos.	Incorporar guías en documentos de planificación municipal y regional.	Principal: DRNA Socios implementadores: Estuario, municipios, agencias reguladoras	3-5 años	Tiempo del personal de la agencia	DRNA, USEPA, municipios, Oficina de Gerencia de Permisos

358 **Manglares**

359 **Estatus**

360 Los bosques de manglar en el EBSJ están dominados principalmente por el mangle blanco (*Laguncularia*
361 *racemosa*), que presenta la mayor densidad de árboles, área basal y biomasa entre las especies de manglar
362 (Lugo y Bauzá Ortega, 2024). Especies no asociadas a manglares, como *Tabebuia heterophylla* y la palma
363 nativa *Roystonea borinquena*, se encuentran en los bordes superiores del manglar, reflejando gradientes de
364 elevación y transiciones de hábitat (Gleason y Cook, 1926; Lugo y Bauzá Ortega, 2024).

365 El mangle blanco posee hojas más pequeñas y anchas, con menor densidad estomática en comparación
366 con el mangle rojo (*Rhizophora mangle*) y el mangle negro (*Avicennia germinans*). Su masa foliar por área y su
367 área foliar específica se asemejan a las del mangle negro, pero difieren del mangle rojo, que presenta las
368 hojas más grandes, pesadas y con mayor densidad estomática (Lugo y Bauzá Ortega, 2024).

369 Especies no halófitas como *Pterocarpus officinalis*, *Amphitecna latifolia* y la especie no nativa *Thespesia*
370 *populnea* crecen en zonas de transición con niveles de agua fluctuantes y salinidad de hasta 30 partes por
371 1,000 (ppt). Estas especies experimentan estrés por sequía cuando disminuye la escorrentía de agua dulce;
372 en particular, *Thespesia populnea* muestra mayor tolerancia a la sequía (Rivera de Jesús, 2020).

373 Branoff (2019) desarrolló un índice urbano para manglares basado en cobertura vegetal, uso de terreno,
374 población y densidad de carreteras, que va desde baja urbanización en Piñones (1 %) hasta alta
375 urbanización en el Caño Martín Peña (100 %). A lo largo de este gradiente, aumentó el número total de
376 especies de árboles debido a introducciones humanas, se incrementó el predominio del mangle blanco y
377 disminuyó la presencia del mangle negro. Los manglares urbanos mostraron niveles más altos de nitrógeno
378 en las hojas, lo que indica menor eficiencia en el uso del agua, metales pesados elevados en los sedimentos
379 (Cu, Pb, Zn), menores profundidades del agua y periodos de inundación más cortos (Lugo y Bauzá Ortega,
380 2024).

381 **Especies clave**

382 El mangle blanco (*Laguncularia racemosa*) es la especie dominante de manglar en el EBSJ, con la mayor
383 densidad de árboles, área basal y biomasa. Otras especies importantes de manglar incluyen el mangle rojo
384 (*Rhizophora mangle*) y el mangle negro (*Avicennia germinans*). Entre las especies no asociadas al manglar que

385 se encuentran en estas zonas están *Pterocarpus officinalis*, *Amphitecna latifolia* y la especie no nativa
386 *Thespesia populnea*, las cuales toleran niveles fluctuantes de agua y salinidad. Estas especies contribuyen a
387 la diversidad estructural de los bosques de manglar y reflejan gradientes de elevación y proximidad a
388 hábitats de tierras altas (Lugo y Bauzá Ortega, 2024; Rivera de Jesús, 2020).

389 Una amplia diversidad de peces y invertebrados depende de las raíces sumergidas del mangle rojo como
390 vivero y hábitat para completar su ciclo de vida.

391 **Metas y objetivos**

- 392 • Mantener la estructura, función y procesos ecológicos de los manglares, y prevenir pérdidas,
393 fragmentación o degradación adicionales (USFWS, 1999).
- 394 • Fomentar el uso de costas vivas que incorporen manglares y otras especies estuarinas para
395 estabilizar la costa y mejorar la calidad del hábitat.
- 396 • Proteger, restaurar y manejar las costas de manglar para apoyar la diversidad de especies, proveer
397 hábitat adecuado para la pesca, reducir inundaciones costeras y ofrecer franjas de protección
398 ribereña.
- 399 • Cuando sea apropiado, reducir la extensión lineal de costas alteradas, erosionadas y endurecidas
400 para permitir la restauración y replantación de manglares, de modo que se provea forraje adecuado
401 y mejor calidad de hábitat.
- 402 • Proteger la diversidad de grupos funcionales.

403 **Eventos extremos recurrentes y otros factores de estrés e impactos**

404 Los manglares en el EBSJ están moldeados tanto por factores ecológicos naturales como por influencias
405 humanas, particularmente la urbanización, que altera la hidrología mediante superficies impermeables,
406 canalización y el manejo de esorrentías pluviales. Estos cambios afectan los periodos de inundación y el
407 transporte de contaminantes, incidiendo sobre el crecimiento de los manglares y la composición de
408 especies. Se espera que el aumento del nivel del mar impulse la migración de los manglares hacia zonas
409 más altas, lo que potencialmente desplazaría humedales de agua dulce. Sin embargo, el desarrollo urbano
410 puede limitar esta migración natural, creando retos para la persistencia de los manglares. El aumento de las
411 temperaturas invernales también está contribuyendo a la expansión de los manglares hacia el norte, en
412 áreas antes dominadas por marismas salobres, con implicaciones para la biodiversidad local y la función del
413 ecosistema. Las costas vivas que utilizan manglares ofrecen una solución natural a la erosión costera y a las
414 inundaciones, mejorando la calidad del hábitat y la resiliencia frente al aumento del nivel del mar y a
415 eventos climáticos extremos.

416

Actividades clave

Actividad	Métricas	Hitos	Partes interesadas y socios responsables	Cronograma	Costos estimados	Posibles fuentes de financiamiento
1. Desarrollar proyectos que incluyan propagación, siembra y monitoreo de manglares urbanos para restaurar y mejorar la calidad del hábitat.	Evaluar cambios en los indicadores de calidad del hábitat.	Evaluar la hidrología actual de las áreas de manglar, identificando factores que afectan el flujo de agua, los niveles de salinidad y el sistema hidrológico en general.	Principales: DRNA, USFWS Socios implementadores: municipios, academia, grupos comunitarios	5+ años	Por determinar según los proyectos seleccionados	DRNA, USFWS
2. Involucrar a la comunidad y a las partes interesadas para alinear el desarrollo costero con la conservación de manglares.	Aumento en el número de partes interesadas relevantes participando en actividades de conservación de manglares.	Identificar las partes interesadas con las que se colaborará para alinear el desarrollo con la conservación de manglares.	Principales: DRNA, Estuario Socios implementadores: municipios, academia, grupos comunitarios	3-5 años	\$75,000	USEPA, DRNA
3. Identificar y mapear los hábitats actuales de manglar para determinar dónde se deben ubicar las actividades de restauración.	Revisar los mapas actuales e identificar vacíos que requieran ser evaluados.	Identificar las condiciones actuales de los manglares.	Principales: DRNA, Estuario Socios implementadores: USFWS, municipios, academia, grupos comunitarios	0-2 años	Por determinar según las necesidades de mapeo	USEPA, DRNA, USFWS

417

Bosques urbanos de tierras altas

418

Estatus

419

420

421

422

423

424

425

426

427

428

Los bosques urbanos de tierras altas y los parches de bosque secundario húmedo subtropical en la cuenca del EBSJ están fragmentados y embebidos en un paisaje altamente urbanizado. Los inventarios de árboles reportan 2,548 ha de manglares más bosques secundarios húmedos subtropicales, lo cual equivale a aproximadamente 11.8 % de la cuenca, y una cobertura urbana promedio de árboles de 24.1 % en 2011 (Brandeis et al., 2014; Tucker Lima et al., 2013). Se estimó que la cuenca contenía 10.1 millones de árboles en 2011, los cuales almacenaban 319,737 toneladas métricas de carbono y secuestraban aproximadamente 28,384 toneladas métricas de carbono por año (Brandeis et al., 2014). Estos parches de bosque en tierras altas suelen ser pequeños, existir como fragmentos remanentes o como árboles sembrados en calles y parques, y se ven afectados por la invasión de árboles ornamentales y de calle no nativos en áreas desarrolladas.

429 **Especies clave**

430 Las especies dominantes en los parches de bosque húmedo y en las siembras urbanas incluyen el tulipán
 431 africano no nativa (*Spathodea campanulata*) y la santa maría nativa (*Calophyllum antillanum*), junto con una
 432 mezcla de especies nativas subtropicales remanentes en los bordes del bosque. Las especies de manglar
 433 (rojo, negro y blanco) dominan las áreas de litoral y franja costera, pero los bordes de transición hacia las
 434 tierras altas contienen *Tabebuia* y palmas nativas señaladas en los inventarios regionales.

435 **Metas y objetivos**

- 436 • Conservar y aumentar la cobertura funcional de bosques urbanos de tierras altas en áreas
 437 prioritarias del EBSJ.
- 438 • Aumentar el reclutamiento de árboles nativos y las especies nativas de dosel sembradas en
 439 vecindarios urbanos mediante la siembra de nuevos árboles en calles y parques con especies
 440 nativas tolerantes a la sequía.
- 441 • Mantener y fortalecer los servicios ecosistémicos de los bosques urbanos, tales como aumentar el
 442 secuestro anual de carbono y cuantificar los ahorros energéticos provistos por la sombra de los
 443 árboles en áreas desarrolladas.
- 444 • Proteger la diversidad de grupos funcionales.

445 **Eventos extremos recurrentes y otros factores de estrés e impactos**

446 Los huracanes, las tormentas tropicales y los eventos de lluvia cada vez más intensos causan mortalidad
 447 directa de árboles, pérdida de la cubierta arbórea y un aumento en la perturbación que abre espacio para el
 448 establecimiento de especies no nativas; la mortalidad de los bosques urbanos puede ser sustancial después
 449 de tormentas mayores (Tucker Lima et al., 2013). Los factores de estrés asociados a la urbanización, como
 450 las superficies impermeables, la hidrología alterada, los efectos de isla de calor, la compactación del suelo y
 451 la contaminación, aumentan la mortalidad de los árboles de calle y favorecen ciertas especies no nativas u
 452 ornamentales sembradas (Tucker Lima et al., 2013). Las tasas de mortalidad de árboles de calle fueron
 453 menores en vecindarios de mayores ingresos, lo que indica posibles consideraciones de equidad en la
 454 cobertura arbórea urbana y en las inversiones de mantenimiento (Tucker Lima et al., 2013).

455 **Actividades clave**

Actividad	Métricas	Hitos	Partes interesadas y socios responsables	Cronograma	Costos estimados	Posibles fuentes de financiamiento
1. Inventariar, priorizar y mapear fragmentos de bosque en tierras altas y posibles lugares de siembra.	Identificar posibles lugares de siembra.	Completar un mapa de priorización que muestre los bosques urbanos y las áreas potenciales para aumentar la conectividad.	Principales: DRNA, Departamento de Agricultura de EE. UU. (USDA) Socios implementadores: municipios, academia, grupos comunitarios	3-5 años	\$250,000	DRNA, USDA

Actividad	Métricas	Hitos	Partes interesadas y socios responsables	Cronograma	Costos estimados	Posibles fuentes de financiamiento
2. Sembrar árboles en calles y parques para maximizar la interceptación de escorrentía pluvial y el enfriamiento.	Aumento en las tasas de supervivencia de los árboles sembrados en áreas urbanas.	Establecer metas anuales de siembra y planes de mantenimiento.	Principales: DRNA, Estuario, USDA Socios implementadores: municipios, academia, grupos comunitarios	3-5 años	Por determinar según el número y tipo de árboles	DRNA, USDA
3. Establecer evaluaciones posteriores a tormentas para promover la vitalidad de los árboles y el dosel urbano.	Crear acciones de seguimiento en escenarios posteriores a tormentas.	Desarrollar métricas para evaluar árboles y doseles urbanos, incluyendo integridad estructural, cobertura de dosel y señales de daño.	Principales: DRNA, USDA Socios implementadores: municipios, academia, grupos comunitarios	3-5 años	\$100,000	DRNA, USDA
4. Invertir recursos en la participación comunitaria y el desarrollo de fuerza laboral para los bosques urbanos.	Aumento en la participación comunitaria.	Involucrar a las partes interesadas de la comunidad para fomentar la conciencia, la participación y el sentido de pertenencia en las iniciativas de silvicultura urbana.	Principales: DRNA, Estuario, USDA Socios implementadores: municipios, academia, grupos comunitarios	5+ años	\$75,000	DRNA, USDA

456 **Monitoreo de respuesta del hábitat**

457 El monitoreo de respuesta del hábitat establecerá métodos confiables y costo efectivos para monitorear y
 458 evaluar de manera sistemática la implementación y el desempeño de las acciones de restauración. El
 459 monitoreo y la evaluación son esenciales para determinar si los proyectos de restauración se desarrollaron
 460 correctamente según fueron diseñados y si se alcanzaron las metas de restauración. Además, ayudan a
 461 asegurar que los recursos del proyecto y del programa se utilicen de manera eficiente y efectiva (NOAA,
 462 2026). La tabla 1 presenta las especies clave, la comunidad, las métricas de monitoreo y las metas que se
 463 evaluarán como parte del monitoreo de respuesta del hábitat.

464

465

466

467

Tabla 1. Especies clave, comunidad, métricas de monitoreo y metas a evaluarse por tipo de ecosistema como parte del monitoreo de respuesta del hábitat

Ecosistema	Especies clave	Comunidad	Métricas	Hitos	Frecuencia de monitoreo
Sistemas bénticos	Poliquetos	Macroinvertebrados bénticos	Porcentaje de cobertura de área	Aumento en la cobertura de área.	Cada 5 años
Arrecifes de coral	Coral cuerno de alce (<i>Acropora palmata</i>) y coral estrella boulder (<i>Orbicella annularis</i>)	Colonias de coral	Porcentaje de cobertura de área en estaciones permanentes de monitoreo, índice de biodiversidad	Aumento en la cobertura de área y abundancia de especies clave de coral.	Trimestral
Yerbas marinas	Yerba de tortuga (<i>Thalassia testudinum</i>)	Vegetación acuática sumergida (yerbas marinas y macroalgas)	Porcentaje de cobertura de área y composición de especies en estaciones permanentes de monitoreo	Aumento en la cobertura de área.	Trimestral
Yerbas marinas	<i>Halophila stipulacea</i> no nativa	Vegetación acuática sumergida (yerbas marinas y macroalgas)	Porcentaje de cobertura de área	Disminución en abundancia y cobertura de área.	Trimestral
Ecosistemas de playa	Uva de playa (<i>Coccoloba uvifera</i>), bejuco de playa (<i>Canavalia rosea</i>), Bayhops (<i>Ipomoea pes-caprae</i>), Batatilla (<i>Ipomoea imperati</i>), gramínea de marisma salobre (<i>Spartina sp.</i>) e Ink berry (<i>Scaevola plumieri</i>)	Plantas costeras nativas	Tasa de supervivencia porcentual, tasa de crecimiento de individuos sembrados (milímetros por año [mm/año])	Aumento en abundancia y longitud de las plantas.	Un mes después de la siembra y luego anualmente
Ecosistemas de playa	Perfiles de playa	Dunas de arena	Tasa de crecimiento de las dunas de arena (mm/año)	Aumento en la altura de las dunas de arena.	Anualmente
Manglares	Mangle rojo (<i>Rhizophora mangle</i>), mangle negro (<i>Avicennia germinans</i>) y mangle blanco (<i>Laguncularia racemosa</i>)	Medición aérea de la cobertura del bosque de manglar	Tasa de supervivencia porcentual y cobertura de área, tasa de crecimiento de individuos sembrados (mm/año)	Aumento en la cobertura de área y la tasa de crecimiento.	Un mes después de la siembra y luego anualmente
Bosques urbanos de tierras altas	Tulipán africano no nativa (<i>Spathodea campanulata</i>)	Áreas protegidas y bosque en la cuenca del EBSJ	Tasa de supervivencia porcentual, cobertura aérea de área, tasa de crecimiento de individuos sembrados (mm/año)	Aumento en la cobertura de área y la tasa de crecimiento.	Un mes después de la siembra y luego anualmente

468 **Referencias**

- 469 Brandeis, T. J. et al. 2014. San Juan Bay Estuary Watershed urban forest inventory. USDA Forest Service,
470 Southern Research Station. <https://research.fs.usda.gov/treesearch/45759>.
- 471 Branoff, B. L. 2019. Quantifying the influence of urbanization on Puerto Rico's mangrove ecosystems.
472 University of Puerto Rico, Río Piedras, PR.
- 473 Cerame Vivas, M. J. 2000. Ecología, Puerto Rico y pensamiento crítico. Editorial Centenario, S.A., Río Piedras,
474 PR.
- 475 Díaz Velázquez, V., and M. Canals Silander. 2020. Erosión en Ocean Park de julio a agosto de 2019: causas,
476 cambios y recuperación. Págs. 120-123 en Programa del Estuario de la Bahía de San Juan, editor.
477 Diagnóstico de vulnerabilidad de la cuenca y el sistema del estuario de la Bahía de San Juan ante el impacto
478 de huracanes. San Juan, PR.
- 479 DNER. 2005. Manual of procedures for the demarcation of the inland interior boundary of maritime-
480 terrestrial public domain assets. San Juan, PR.
- 481 FEMA. 2018. Restoring Sand Dunes Along Puerto Rico's North Coast. [https://www.fema.gov/press-
482 release/20250602/restoring-sand-dunes-along-puerto-ricos-north-coast-0](https://www.fema.gov/press-release/20250602/restoring-sand-dunes-along-puerto-ricos-north-coast-0).
- 483 Filippo Ferrario, Michael W. Beck, Curt D. Storlazzi, Fiorenza Micheli, Christine C. Shepard and Laura Airoidi,
484 2014. [The effectiveness of coral reefs for coastal hazard risk reduction and adaptation](#). [Nature
485 Communications](#), Nature, vol. 5(1), pages 1-9.
- 486 Fields, C. A., and G. Jordan. 1972. Storm-waves wash along the north coast of Puerto Rico. Hydrologic
487 Investigations Atlas HA-430. U.S. Geological Survey, Washington, D.C.
- 488 Folke, C., 2016. Resilience (republished). *Ecol. Soc.* 21 (4), 44.
- 489 Kaye, C. A. 1959. Shoreline features and Quaternary shoreline changes Puerto Rico. Geological Survey
490 Professional Paper 317-B, Washington, DC. 140 p.
- 491 LG2 Environmental Solutions and CSA Ocean Sciences Inc. 2021. San Juan harbor mitigation and source, San
492 Juan, Puerto Rico. Benthic Resource Survey. CSA-LG2-FL-21-81695-3687-04-rep-01-VER01, Stuart, FL.
- 493 Lugo, A.E. and Bauzá Ortega, J.F. 2024. San Juan Bay Estuary: Research History and Opportunities. EPA
494 600/R-23/308. Office of Research and Development, Center for Environmental Measurement and Modeling,
495 Atlantic Coastal Environmental Sciences Division.
- 496 McLeod, K.L., Leslie, H.M. (Eds.), 2009. Ecosystem-based Management for the Oceans. Island Press,
497 Washington, DC.
- 498 McLeod, E., Anthony, K. R.N., Mumby, P. J., Maynard, J., Beeden, R., Graham, N. A.J., Heron, S. F., Hoegh-
499 Guldberg, O., Jupiter, S., MacGowan, P., Mangubhai, S., Marshall, N., Marshall, P. A., McClanahan, T. R.,
500 McLeod, K., Nyström, M., Obura, D., Parker, B., Possingham, H. P., and Salm, R. V. (2019). The future of
501 resilience-based management in coral reef ecosystems. *Journal of Environmental Management*, 233, 291-301.
502 <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.11.034>.

- 503 NOAA. 2026. Guidance for Proposing and Conducting Tier 1 Monitoring. Accessed at
504 [https://www.fisheries.noaa.gov/national/habitat-conservation/monitoring-and-evaluation-restoration-](https://www.fisheries.noaa.gov/national/habitat-conservation/monitoring-and-evaluation-restoration-projects)
505 [projects](https://www.fisheries.noaa.gov/national/habitat-conservation/monitoring-and-evaluation-restoration-projects).
- 506 PBS&J. 2009. Development of the Benthic Index for San Juan Bay Estuary System: Final Report (September
507 2009). <https://estuario.org/wp-content/uploads/2021/02/SJBEP-Benthic-Index-Final-Report-compressed.pdf>.
- 508 Rodríguez, M., et al. 1992. Description of coral reef communities in San Juan Bay Estuary.
- 509 Rivera de Jesús, E. 2020. Evaluación de vulnerabilidad de los manglares en el estuario de la Bahía de San
510 Juan. Págs. 82-85 en Programa del Estuario de la Bahía de San Juan, editor. Diagnóstico de vulnerabilidad de
511 la cuenca y el sistema del estuario de la Bahía de San Juan ante el impacto de huracanes. San Juan, PR.
- 512 Rivera, J. A. 2005. Findings on the benthic assessment of the San Juan Bay Estuary, Puerto Rico. NOAA
513 Fisheries, Southeast Fisheries Science Center, Miami Laboratory, Protected Resources and Biodiversity
514 Division, Miami, FL.
- 515 Tucker Lima, J. M. et al. 2013. Temporal dynamics of a subtropical urban forest in San Juan, Puerto Rico,
516 2001- 2010. USDA Forest Service, Southern Research Station. <https://research.fs.usda.gov/treesearch/47120>.

1 **Table of Contents**

2 Introduction3

3 Regulatory and Policy Considerations.....4

4 Benthic Systems5

5 Status5

6 Key Species.....6

7 Goals and Objectives6

8 Recurring Extreme Weather Events and Other Stressors and Impacts.....6

9 Key Activities7

10 Coral Reefs7

11 Status7

12 Key Species.....8

13 Goals and Objectives8

14 Recurring Extreme Weather Events and Other Stressors and Impacts.....8

15 Key Activities9

16 Seagrasses9

17 Status9

18 Key Species..... 10

19 Goals and Objectives 10

20 Recurring Extreme Weather Events and Other Stressors and Impacts..... 10

21 Key Activities 11

22 Beach Ecosystems..... 11

23 Status 11

24 Key Species..... 12

25 Goals and Objectives 12

26 Recurring Extreme Weather Events and Other Stressors and Impacts..... 12

27 Key Activities 13

28 Mangroves 13

29 Status 13

30 Key Species..... 14

31 Goals and Objectives 14

32 Recurring Extreme Weather Events and Other Stressors and Impacts..... 14

33 Key Activities 15

34 Upland Urban Forests 15

35 Status 15

36 Key Species..... 16

37 Goals and Objectives 16

38 Recurring Extreme Weather Events and Other Stressors and Impacts 16

39 Key Activities 16

40 Habitat Response Monitoring 17

41 References 18

42

43

44 Introduction

45 The San Juan Bay Estuary (SJBE) is a vital coastal ecosystem supporting diverse habitats including benthic
46 systems, coral reefs, seagrass beds, beach ecosystems, mangroves, and upland urban forests. These
47 habitats provide essential ecosystem services such as nursery grounds for fisheries, coastal protection,
48 water filtration, and biodiversity support. However, the SJBE faces significant environmental challenges
49 driven by urbanization, nutrient enrichment, sedimentation, hydrological alterations, and extreme weather
50 events. The SJBE is highly urbanized, and in many areas, historic habitat conditions have been irreversibly
51 altered by development and ongoing pollutant inputs. While full restoration to pre-urban conditions may
52 not be feasible across the watershed, the objective of this strategy is to restore and sustain functional
53 habitats that provide critical ecosystem services, even within an urban setting. In addition, non-native
54 species, such as alligators, iguanas, snakes, lionfish, and fleka fish, affect the viability of native species and
55 can have effects on public health. While this plan does not address non-native species management, several
56 agencies provide this service. The National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) manages non-
57 native species in Puerto Rico through fishery plans and marine monitoring. The Department of Natural and
58 Environmental Resources (DNER) manages import permits for specific species and has a strategy to track
59 and manage introduced non-native species. The U.S. Fish and Wildlife Service (USFWS) works with DNER on
60 these management efforts.

61 This Habitat Strategy responds directly to the habitat and ecosystem issues identified in the Estuario Plan
62 *Ensure Functioning Ecosystems* action plan, which emphasizes the protection, restoration, and long-term
63 resilience of the SJBE's interconnected coastal and urban systems. This strategy focuses on the habitats
64 prioritized in the action plan including benthic systems, mangroves, seagrass beds, coral reefs, riparian
65 corridors, beach ecosystems, and upland urban forests, all of which support important ecological functions
66 and key species in the estuary. These key species include the Antillean manatee, green sea turtle, blue land
67 crab, and numerous rare, threatened, endemic, and endangered plant species. By aligning habitat
68 restoration and protection efforts with these priorities, this strategy addresses the major stressors affecting
69 the estuary system, including habitat loss and fragmentation, altered hydrology, sedimentation, pollution,
70 urban development, and extreme weather effects.

71 In response to habitat degradation and declining water quality, restoration and management efforts have
72 increased in recent years. The SJBE community is applying coordinated science-based approaches to
73 conserve and restore critical habitats. Restoration projects in the SJBE include seagrass planting, fish and
74 shellfish nursery habitat creation, mangrove planting, artificial reef deployment, and shoreline stabilization,
75 supported by local, state, and federal partners. Achieving functional habitats will require strategic
76 prioritization of sites with the highest ecological return, implementation of green, blue and gray
77 infrastructure to reduce stressors, creation and protection of habitat refugia and connectivity, and an
78 adaptive management framework with clear performance metrics and long-term monitoring.

79 This Habitat Strategy is intended to support implementation of the Estuario Plan *Ensure Functioning*
80 *Ecosystems* action plan, rather than serve as a stand-alone document. In particular, it advances the habitat
81 and ecosystem-based priorities established under the action plan by providing a framework for the
82 protection, restoration, and stewardship of the major habitats of the SJBE system. The strategy translates

83 the broader goals of the Plan into habitat-specific goals, objectives, and activities, while also identifying key
84 partners, potential costs and funding sources needed to guide effective action.

85 The SJBE faces complex challenges including legacy effects from development, ongoing pollutant inputs, and
86 extreme weather events and sea level rise, which complicate restoration timelines and success. This report
87 emphasizes the importance of flexible, resilience-based management (RBM), and science-informed
88 strategies that recognize spatial variability in habitat conditions and recovery potential. It also highlights the
89 need for sustained funding, interagency coordination, and community engagement to achieve restoration
90 goals. Community partnerships and targeted policy actions will be essential to balance urban uses with
91 achievable ecological outcomes, and to ensure that restoration investments deliver measurable ecosystem
92 services and resilience benefits for both nature and people.

93 The SJBE community believes that by building on past successes and emerging science, this strategy will
94 guide effective stewardship to preserve and enhance the estuary's ecological and economic values for
95 current and future generations.

96 According to McLeod and Leslie (2009) RBM is defined as an integrated management approach that
97 considers the entire ecosystem, including humans, and the full spectrum of ways that people use, benefit
98 from, and value nature. The main goal of RBM is to identify, prioritize, and implement management actions
99 that enhance system resilience and human well-being by protecting processes and species that support a
100 system's capacity to withstand stressors. In other words, an ecosystem that maintains and recovers its
101 structure and functions in the face of disturbance and change (resilience). Such actions may include
102 controlling pollution, sedimentation, overfishing, managing key species, and improving water quality
103 (McLeod et al., 2019). RBM also includes strategies to build and support the capacity of people to learn,
104 share knowledge, innovate, and adjust responses and institutions to changing external drivers and internal
105 processes (Folke, 2016). Thus, a RBM approach will guide the implementation of this Estuario Habitat
106 Restoration Strategy through the following management actions, common to all habitats:

- 107 • Protect a diversity of species, habitats, and functional groups.
- 108 • Maintain pathways of connectivity.
- 109 • Reduce ecosystem stressors.
- 110 • Implement marine protected areas to support estuarine resilience.
- 111 • Incorporate social and ecological indicators (resilience indicators) to assess early warnings, recovery
112 patterns, and regime shifts in conservation planning and monitoring.
- 113 • Invest in experimental approaches to support resilience.
- 114 • Implement strategies to build social and ecological adaptive capacity.

115 **Regulatory and Policy Considerations**

116 This strategy recognizes that changes in local, territorial, or federal regulations including permitting, water
117 quality standards, land use policies, and funding mechanisms can affect protection and restoration
118 strategies, costs, and timelines. This strategy commits to ongoing review of regulations and guidance to
119 reduce delays in implementation timelines. Estuario will track regulatory changes and assess implications
120 for projects and priorities so that actions, timelines, and performance measures can be modified without
121 jeopardizing the necessary ecological outcomes or fiscal accountability needed for success.

122 It is also important to note that permitted urban uses and restoration goals may be in conflict, which could
123 affect the benefits of implementing the activities in this strategy. Improving coordination between
124 development permits and habitat restoration is an important component for success. The municipalities
125 within the SJBE watershed develop the Territorial Plan, which regulates land use, zoning, and urban
126 development. This plan is prepared in accordance with the Municipal Code of Puerto Rico (Law No. 107),
127 which requires that each municipality update their development guidelines every eight years. This process
128 can help with establishing buffer zones, green infrastructure requirements, and ecological corridors to
129 support this Habitat Restoration Strategy. The lead implementors for the key activities identified in this
130 strategy should coordinate with the municipalities to determine how modifications to the Territorial Plan
131 could support habitat restoration and conservation.

132 Benthic Systems

133 Status

134 Benthic systems in the SJBE have been extensively studied, with about half of the benthic habitats mapped
135 using side scan sonar technology (Rivera, 2005). This mapping has revealed diverse and ecologically
136 important habitats, including submerged aquatic vegetation (SAV) beds predominantly made up of *Halophila*
137 *decipiens* and red algae, as well as large bivalve beds dominated by *Mytilopsis domingensis*. These habitats
138 are found on a variety of substrates ranging from natural, undisturbed bottoms to dredged zones and
139 artificial structures, highlighting the complexity and variability of benthic environments in the estuary.
140 Notably, SAV tends to be more abundant in less disturbed areas, while bivalve beds are especially
141 concentrated in the San José Lagoon, an area historically known for large aggregations of *Perna* species
142 (Lugo and Bauzá Ortega, 2024, p. 33).

143 The benthic macrofaunal community is largely dominated by polychaetes, with more than 250 taxa
144 identified, although the community structure is characterized by a few dominant species (PBS&J, 2009).
145 Species richness and dominance are notably higher along dredged channels, indicating that human
146 activities such as dredging significantly influence benthic community composition. To assess these benthic
147 systems, researchers use a Benthic Index that considers family-level diversity and sensitivity to pollution.
148 Some sites considered pristine, such as Piñones Lagoon, have low index values similar to polluted areas.
149 This suggests that factors beyond pollution, such as limited water flushing due to distance from the ocean,
150 also play a crucial role in shaping benthic conditions. Additional stressors such as sediment toxicity and
151 frequent disturbances of the bottom sediment are linked to reduced benthic diversity in certain locations
152 (Lugo and Bauzá Ortega, 2024).

153 Furthermore, the accumulation of nutrient-rich muck in sediments creates low oxygen conditions and
154 elevated sulfide concentrations, which adversely affect infaunal biodiversity and disrupt essential processes
155 such as nutrient cycling. These conditions impair the overall function and resilience of the benthic
156 ecosystem. To address these issues, restoration efforts are focused on reducing nutrient inputs to improve
157 sediment quality and promote recovery of benthic communities. Continuous monitoring of environmental
158 factors such as temperature and dissolved oxygen is conducted to better understand their effects on
159 benthic system resilience and guide future management strategies (Lugo and Bauzá Ortega, 2024).

160 In summary, the benthic systems in the SJBE are diverse but face challenges from both non-anthropogenic
161 and anthropogenic influences. While certain areas maintain complex benthic communities, others suffer
162 from pollution, sediment toxicity, and physical disturbances, underscoring the need for ongoing restoration
163 and monitoring efforts to sustain these vital ecosystems.

164 **Key Species**

165 Key species in benthic systems include Polychaetes (*Dominant meiofauna*), bivalves (*Mytilopsis domingensis*,
166 *Perna* species), blue crabs (*Callinectes sapidus*), red mangrove oysters (*Crassostrea rhizophorae*), flat tree
167 oysters (*Isognomon alatus*), and diverse benthic invertebrates inhabiting mud and sediment substrates. Non-
168 halophytic upland species near benthic areas include *Tabebuia heterophylla* and the native palm, *Roystonea*
169 *borinquena* (Lugo and Bauzá Ortega, 2024).

170 **Goals and Objectives**

- 171 • Attain and maintain sediment quality that supports diverse benthic communities and ecosystem
172 functions.
- 173 • Reduce nutrient and pollutant inputs from land sources.
- 174 • Monitor benthic diversity and sediment conditions to guide adaptive management.
- 175 • Protect functional group diversity.

176 **Recurring Extreme Weather Events and Other Stressors and Impacts**

177 Changes in sediment quality and benthic environmental parameters can be influenced by rising
178 temperatures and increased rainfall, including long-term trends in sediment oxygen levels, sulfide
179 concentrations, acidity, and alterations caused by human-built infrastructure and sea level rise. Therefore, it
180 is important to track shifts in benthic species composition and diversity, particularly among infaunal and
181 epifaunal communities, to understand biological responses linked to sediment and benthic habitat
182 conditions. In addition, there are emerging concerns related to coastal acidification within benthic
183 environments, where nutrient influxes from stormwater and accumulated land-based sediments elevate
184 hydrogen sulfide levels, reduce oxygen availability, and increase sediment acidity. These changes challenge
185 the survival and shell formation of calcium carbonate-dependent benthic organisms. Further research is
186 needed to better understand acidification effects on benthic sediments and the biological resilience of shell-
187 building species.

188 **Key Activities**

Key Activities	Performance Measures	Targets	Lead Implementor(s) and Partner(s)	Timeframe	Estimated Costs	Potential Funding Sources
1. Based on the monitoring results, develop projects that include sediment restoration efforts, target contaminated sediments removal, and improve benthic habitat quality within the estuary.	Evaluate changes in benthic habitats due to restoration projects.	Performed assessments to identify and prioritize locations within the SJBE that require sediment restoration and removal based on ecological significance and current habitat quality.	Lead: DNER Implementing partners: municipalities, academia, community groups, U.S. Army Corps of Engineers (USACE)	5+ years	\$350,000	U.S. Environmental Protection Agency (USEPA), DNER, municipalities, USACE, academia
2. Monitor and manage sediment quality to reduce toxicity and disturbances that negatively affect benthic biodiversity and ecosystem functions.	Reduce levels of contaminants in sediments within the SJBE.	Developed and implemented management strategies aimed at reducing toxicity and disturbances, such as source control measures, sediment remediation, or habitat restoration.	Leads: DNER, Estuario Implementing partners: municipalities, academia, community groups	0-2 years	TBD based on strategies and monitoring needed	USEPA, DNER, municipalities
3. Support restoration efforts aimed at enhancing benthic habitat complexity and resilience by promoting the recovery of submerged aquatic vegetation and benthic key species.	Increase established vegetation and bivalve beds.	Identified specific areas within the SJBE where submerged aquatic vegetation and key benthic species have been degraded or lost, prioritizing sites for restoration efforts.	Leads: DNER, Estuario Implementing partners: municipalities, academia, community groups	3-5 years	\$500,000	USEPA, DNER, municipalities

189 **Coral Reefs**

190 **Status**

191 The SJBE contains a “broken chain of poorly developed reefs” lying mostly about a mile offshore, extending
 192 eastward from San Juan to Punta Vacía Talega (Kaye, 1959). These reefs consist of thin coral colonies
 193 growing on a shallow eolianite platform aligned with eolianite ridges. Healthy Caribbean reef crests can
 194 attenuate up to 97% of incoming waver energy (Ferrario et al., 2014)

195 Coral communities are most prominent in the Condado Lagoon, and, as well as along the offshore coast
 196 from Cataño to Loíza (Rodríguez et al., 1992). Within this reef chain is the Arrecife marine reserve, which
 197 harbors threatened reef-building corals including *Acropora palmata* and *Orbicella annularis* (Lugo and Bauzá
 198 Ortega, 2024).

199 Corals in the SJBE grow best under transparent waters with strong currents and stable temperature, salinity,
 200 and low nutrient conditions. They are stressed by fluctuations in salinity and temperature, nutrient
 201 enrichment, and sediment deposition that reduces water clarity. These stressful conditions are more
 202 pronounced within the lagoons compared to offshore Atlantic Ocean waters (Lugo and Bauzá Ortega, 2024).

203 **Key Species**

204 The reef-building corals *Acropora palmata* (elkhorn coral, branching) and *Orbicella annularis* (boulder star
205 coral, massive), both ESA-listed as Threatened, are particularly important within the Arrecife marine reserve.
206 The reef system also includes a variety of thin coral colonies growing on eolianite platforms, forming a chain
207 extending from San Juan to Punta Vacía Talega (Loíza). These coral communities thrive in locations with
208 clear, transparent waters, strong currents, and stable temperature, salinity, and nutrient conditions but are
209 sensitive to environmental stressors such as sedimentation, nutrient enrichment, and fluctuating salinity
210 and temperature (Lugo and Bauzá Ortega, 2024; Kaye, 1959; Rodríguez et al., 1992). One important key
211 species is the long-spined sea urchin (*Diadema antillarum*) due to its role as algae control in coral reefs and
212 to the ongoing recovery from the 1983–1993 Caribbean-wide die-off.

213 **Goals and Objectives**

- 214 • Identify coral reef chemical, physical, and ecological stressors.
- 215 • Identify where coral growth is possible and necessary.
- 216 • Monitor coral reef area cover and species diversity.
- 217 • Protect and restore water quality to support coral reefs.
- 218 • Preserve key reef-building corals, including threatened species *Acropora palmata* and *Orbicella*
219 *annularis*.
- 220 • Monitor environmental conditions affecting coral reefs to guide management.
- 221 • Conserve critical reef habitats, especially within protected areas such as the Arrecife marine reserve.
- 222 • Identify and implement novel restoration techniques such as artificial reefs deployment, coral
223 colonies gardening and transplantation.
- 224 • Protect functional group diversity.
- 225 • Identify key groups of herbivores that can support coral reef larval recruitment and recovery.

226 **Recurring Extreme Weather Events and Other Stressors and Impacts**

227 Coral reefs in the SJBE are vulnerable to increasing water temperatures, salinity fluctuations, and ocean
228 acidification. These factors can cause coral bleaching, reduce calcification rates, and impair reef growth and
229 resilience. Sea level rise may alter light availability and water depth around reefs, potentially affecting coral
230 distribution and condition. Additionally, more frequent and intense storms can increase sediment runoff
231 and physical damage to reef structures. Maintaining stable water quality and reducing localized stressors
232 such as nutrient enrichment and sedimentation are critical to enhancing coral reef resilience in the face of
233 these changing environmental conditions.

234

Key Activities

Activities	Performance Measures	Targets	Lead Implementor(s) and Partner(s)	Timeframe	Estimated Costs	Potential Funding Sources
1. Reduce sediment and nutrient inputs to improve water clarity and reef habitat quality.	Improved water quality through turbidity measurements in the SJBE.	Outlined specific strategies for reducing sediment and nutrient input, such as implementing best management practices (BMPs).	Lead: DNER Implementing partners: municipalities, academia, community groups	5+ years	TBD based on projects implemented	USEPA, DNER, municipalities
2. Monitor coral reefs for effects from environmental conditions such as temperature, salinity, and nutrient levels.	Collect data routinely to identify long-term trends.	Scheduled and conduct regular data collection intervals. Periodically analyze collected data.	Leads: DNER, Estuario Implementing partners: municipalities, academia	0-2 years	TBD based on monitoring needed	USEPA, DNER
3. Protect and manage critical reef areas and threatened coral species.	Increase in critical reef areas for their protection and management.	Identified key species, habitat conditions, and current threats in the Arrecife marine reserve.	Leads: DNER, USFWS Implementing partners: municipalities, academia, community groups	0-2 years	Agency staff time	USEPA, DNER, USFWS
4. Implement novel coral reef restoration techniques.	Increase in coral colonies recruitment and area cover.	Identified key species.	Leads: DNER, U.S. Fish and Wildlife Service (USFWS) Implementing partners: municipalities, academia, community groups	3-5 years	TBD based on type of restoration practices	USEPA, DNER, USFWS
5. Identify and map the current conditions of corals within the SJBE.	Review current maps and identify gaps in need of being surveyed.	Identified current conditions on corals.	Leads: DNER, Estuario Implementing partners: municipalities, academia, community groups	0-2 years	TBD based on mapping needs.	USEPA, DNER, USFWS

235

Seagrasses

236

Status

237

238

239

240

241

Seagrass beds constitute a major portion of the benthic environment in the SJBE, covering approximately 60% of the benthic substrates in areas such as Condado Lagoon (LG2 Environmental Solutions and CSA Ocean Sciences, 2021). Five seagrass species have been recorded, listed in order of relative coverage: turtle grass (*Thalassia testudinum*), paddle grass (*Halophila decipiens*), nonnative aggressive growing species *Halophila stipulacea*, manatee grass (*Syringodium filiforme*), and shoal grass (*Halodule wrightii*). Macroalgae

242 are also a prominent component of these beds, often thriving under nutrient-enriched conditions, which
243 can lead to competition with seagrasses and affect their abundance (Lugo and Bauzá Ortega, 2024).

244 Seagrass growth relies heavily on water transparency and low nutrient concentrations. When waterbodies
245 become eutrophic, macroalgae tend to flourish at the expense of seagrasses. Additionally, seagrass
246 coverage tends to decline with increasing water depth and reduced light availability, highlighting their
247 sensitivity to changes in water quality and clarity (Lugo and Bauzá Ortega, 2024).

248 Unlike coral reefs, which require strong currents and stable environmental conditions, seagrasses are
249 adapted to relatively calm waters. However, they remain vulnerable to declines in water quality, requiring
250 clear waters with low nutrient inputs to maintain thriving and resilient beds.

251 **Key Species**

252 Five seagrass species have been recorded: shoal grass (*Halodule wrightii*), manatee grass (*Syringodium*
253 *filiforme*), paddle grass (*Halophila decipiens*), turtle grass (*Thalassia testudinum*), and nonnative *Halophila*
254 *stipulacea* (Lugo and Bauzá Ortega, 2024; LG2 Environmental Solutions and CSA Ocean Sciences, 2021).
255 Seagrass-dependent species include the endangered Antillean manatee (*Trichechus manatus manatus*; and
256 endangered juvenile green sea turtles (*Chelonia mydas*). Commercially important invertebrates include the
257 queen conch (*Lobatus gigas*) and the Caribbean spiny lobster (*Panulirus argus*). Other species to consider as
258 key species are the red cushion starfish (*Oreaster reticulatus*). *Halophila stipulacea* is an aggressive non-native
259 species (Indo-Pacific origin, first documented in the Caribbean off Grenada in 2002) that is rapidly displacing
260 native seagrasses across the region, including in Puerto Rico. Thus, is important to monitor its spread and
261 ecological effects.

262 **Goals and Objectives**

- 263 • Attain and maintain water, sediment and light quality for seagrass recovery and expansion.
- 264 • Monitor restoration project progress and performance.
- 265 • Develop and share best practices for seagrass restoration.
- 266 • Reduce nutrient enrichment and improve water clarity.
- 267 • Protect functional group diversity.
- 268 • Monitoring the spread and ecological effects of aggressive non-native species such as *Halophila*
269 *stipulacea*.

270 **Recurring Extreme Weather Events and Other Stressors and Impacts**

271 Extreme weather events and sea level rise are anticipated to significantly influence seagrass distribution,
272 abundance, and survival in the SJBE. Key factors such as shifts in water temperature, salinity, pH, water
273 depth, and nutrient loading operate synergistically, creating complex challenges that require thorough study
274 and modeling to inform effective restoration and management strategies.

275

Key Activities

Activities	Performance Measures	Targets	Lead Implementor(s) and Partner(s)	Timeframe	Estimated Costs	Potential Funding Sources
1. Develop and implement a SJBE-wide Seagrass Restoration Plan to guide recovery and expansion efforts.	Approve restoration plan for seagrasses in the SJBE.	Developed clear restoration objectives, including specific targets for seagrass coverage metrics.	Leads: DNER, Estuario Implementing partners: municipalities, academia, community groups	3-5 years	\$100,000	USEPA, DNER
2. Establish or update water quality targets including light quality optimized for seagrass growth, including light availability, sediment quality, and nutrient thresholds.	Measure positive changes in water quality indicators.	Collaborated with water quality experts and other relevant stakeholders to gather input on current research regarding water quality parameters that support optimal seagrass growth.	Leads: DNER, Estuario Implementing partners: municipalities, academia	0-2 years	\$100,000	USEPA, DNER
3. Monitor restoration progress and share best practices to enhance ongoing and future seagrass protection efforts.	Implement best practices to improve seagrass restoration success.	Compiled a guide of best practices based on successful strategies used in seagrass restoration efforts.	Leads: DNER, Estuario Implementing partners: municipalities, academia, community groups	0-2 years	TBD based on monitoring needed	USEPA, DNER
4. Evaluate and monitor the ecological effects of non-native species and develop control measurement if necessary.	Limit expansion in SJBE seagrass beds,	Compiled data of potential ecological effects and develop control strategies.	Leads: DNER, Estuario Implementing partners: municipalities, academia, community groups	0-2 years	TBD based on monitoring needed	DNER, NOAA

276

Beach Ecosystems

277

Status

278

279

280

281

282

283

284

285

286

The SJBE contains interconnected sandy beaches, beach thickets, and sand-dune systems that function as a dynamic coastal ecosystem shaped by wind, waves, tides, and offshore currents. These habitats support diverse assemblages documented by Cerame Vivas (2000) and DNER (2005) and are essential for sand storage, shoreline protection, nutrient cycling, and wildlife habitat (Lugo and Bauzá Ortega, 2024). Wave energy, reef barriers, and seasonal wind patterns strongly influence whether beaches accumulate or lose sand. Without functional reef barriers, sand is more likely to be lost offshore, reducing natural recovery potential (Díaz Velázquez and Canals Silander, 2020; Lugo and Bauzá Ortega, 2024). Historical and ongoing human actions, including sand mining for construction, sand harvesting and placement associated with airport and road fill, and coastal development, have removed dune buffers, altered sediment transport,

287 raised soil levels in mangroves, and enabled establishment of nonnative or terrestrial species that change
288 habitat structure (Lugo and Bauzá Ortega, 2024).

289 **Key Species**

290 Sandy and rocky beach assemblages support diverse infaunal and epifaunal communities and are inhabited
291 by crustaceans such as hermit crabs (*Coenobita spp.*) and the Atlantic ghost crab (*Ocypode quadrata*). Dune
292 and thicket vegetation, including sea grape (*Coccoloba uvifera*), sea side bean (*Canavalia rosea*), Bayhops
293 (*Ipomoea pes-crapae*), Batatilla (*Ipomoea imperati*), and Ink berry (*Scaevola plumieri*), among other coastal
294 plants, help stabilize the sand, provide wind buffering, and produce a distinct zonation from the strand to
295 inland thickets (Lugo and Bauzá Ortega, 2024). These dune-backed beaches also serve as important nesting
296 habitat for sea turtles, notably hawksbill (*Eretmochelys imbricata*), green (*Chelonia mydas*), and leatherback
297 (*Dermochelys coriacea*). (Cerame Vivas, 2000; DNER, 2005; Lugo and Bauzá Ortega, 2024; Federal Emergency
298 Management Agency [FEMA], 2018).

299 **Goals and Objectives**

- 300 • Preserve and restore the integrated beach ecosystem (sandy beaches, beach thickets, and sand
301 dunes) to maintain natural sand transport, shoreline stability, and habitat function.
- 302 • Protect native beach, dune, and thicket species and the functional diversity they represent.
- 303 • Restore and protect reef barriers, submerged dunes, and nearshore features that retain sand and
304 support natural beach recovery.
- 305 • Stabilize dunes using native vegetation and conserve freshwater resources to sustain dune
306 communities and prevent saltwater intrusion.
- 307 • Monitor beach morphology, sediment dynamics, vegetation structure, and biotic use (including sea
308 turtle nesting) to support adaptive management.
- 309 • Prevent harmful practices (e.g., sand mining) and limit development that reduces dune/beach
310 buffering capacity and degrades adjacent mangrove and wetland habitats.

311 **Recurring Extreme Weather Events and Other Stressors and Impacts**

312 High-energy storm waves and hurricanes can exceed normal high-tide levels, overtop dunes, cause severe
313 beach erosion, and damage infrastructure (Fields and Jordan, 1972; Lugo and Bauzá Ortega, 2024). Sea level
314 rise and chronic inundation reduce beach area, alter dune groundwater lenses, and increase vulnerability of
315 thickets and other inland habitats (Lugo and Bauzá Ortega, 2024). Reduced reef function, whether from
316 natural causes or anthropogenic loss, diminishes nearshore sand retention and raises the probability of
317 sand being lost to deeper offshore zones (Díaz Velázquez and Canals Silander, 2020; Lugo and Bauzá
318 Ortega, 2024). Wind stress and salt spray shape thicket zonation but can also limit recruitment where
319 extreme events or altered sediment supply occur (Lugo and Bauzá Ortega, 2024).

320

Key Activities

Activities	Performance Measures	Targets	Lead Implementor(s) and Partner(s)	Timeframe	Estimated Costs	Potential Funding Sources
1. Implement erosion control and sand-nourishment projects that align with natural coastal processes, as well as reducing human foot traffic.	Observed changes in shoreline stability, measured erosion/accretion rates.	Identify and prioritize specific locations for nature-based and human foot traffic erosion control and sand nourishment.	Lead: DNER Implementing partners: Estuario, municipalities, academia, USACE, community groups	3-5 years	TBD based on selected projects	DNER, USEPA, USACE, municipalities
2. Protect and restore offshore reef barriers and submerged dune features to improve sand retention and recovery.	Area of reef/submerged dune features protected/restored.	Completed assessments of reef and submerged dune functionality.	Lead: DNER Implementing partners: Estuario, academia, USACE, community groups	5+ years	TBD based on selected projects	DNER, USEPA, USACE, municipalities
3. Restore and stabilize sand dunes using native vegetation reproduced in the SJBE nursery.	Identification of vegetation survival and growth rates.	Restored dune sites with stabilized profiles and native plant cover.	Lead: DNER Implementing partners: Estuario, municipalities, community groups	5+ years	TBD based on selected projects	DNER, USEPA, municipalities
4. Protect and restore beach thicket forests and maintain zonation patterns to preserve wind-buffering function.	Area of beach thicket protected or restored.	Identified and restored degraded thicket areas plus the establishment of long-term monitoring.	Lead: DNER Implementing partners: Estuario, municipalities, academia, community groups	5+ years	TBD based on selected projects	DNER, USEPA, municipalities
5. Integrate dune conservation into land-use and water-resource planning to prevent saltwater intrusion and support vegetation.	Inclusion of dune conservation measures in land-use plans.	Guidelines incorporated into municipal and regional planning documents.	Lead: DNER Implementing partners: Estuario, municipalities, regulatory agencies	3-5 years	Agency staff time	DNER, USEPA, municipalities, OGP

321 **Mangroves**

322 **Status**

323 Mangrove forests in the SJBE are primarily dominated by white mangroves (*Laguncularia racemosa*), which
 324 have the highest tree density, basal area, and biomass among mangrove species (Lugo and Bauzá Ortega,
 325 2024). Non-mangrove species such as *Tabebuia heterophylla* and the native palm *Roystonea borinquena* occur
 326 at mangrove upland edges, reflecting elevational gradients and habitat transitions (Gleason and Cook, 1926;
 327 Lugo and Bauzá Ortega, 2024).

328 White mangroves possess smaller, wider leaves with lower stomatal density compared to red (*Rhizophora*
 329 *mangle*) and black mangroves (*Avicennia germinans*). Their leaf mass per area and specific leaf area

330 resembles black mangroves but differ from red mangroves, which have the largest, heaviest leaves and
331 highest stomatal density (Lugo and Bauzá Ortega, 2024).

332 Non-halophytic species such as *Pterocarpus officinalis*, *Amphitecna latifolia*, and the nonnative *Thespesia*
333 *populnea* grow in transitional zones with fluctuating water tables and salinity up to 30 parts per thousand
334 (ppt). These species experience drought stress when freshwater runoff declines; notably, *Thespesia populnea*
335 shows greater drought tolerance (Rivera de Jesús, 2020).

336 Branoff (2019) developed an urban index for mangroves based on vegetation cover, land use, population,
337 and road density, ranging from low urbanization at Piñones (1%) to high at CMP (100%). Along with this
338 gradient, total tree species increased due to human introductions, white mangrove dominance rose, and
339 black mangrove presence declined. Urban mangroves showed higher leaf nitrogen, indicating reduced
340 water use efficiency, elevated sediment heavy metals (Cu, Pb, Zn), shallower water depths, and shorter
341 flooding durations (Lugo and Bauzá Ortega, 2024).

342 **Key Species**

343 White mangrove (*Laguncularia racemosa*) is the dominant mangrove species in the SJBE, exhibiting the
344 highest tree density, basal area, and biomass. Other important mangrove species include red mangrove
345 (*Rhizophora mangle*) and black mangrove (*Avicennia germinans*). Non-mangrove species found within
346 mangrove zones include *Pterocarpus officinalis*, *Amphitecna latifolia*, and the nonnative *Thespesia populnea*,
347 which tolerate fluctuating water tables and salinity levels. These species contribute to the structural diversity
348 of mangrove forests and reflect elevational gradients and proximity to upland habitats (Lugo and Bauzá
349 Ortega, 2024; Rivera de Jesús, 2020). Many fish, reptiles, insects, and bird species use mangrove habitats for
350 some portion of their life cycles. A wide diversity of invertebrates and crustaceans also rely on mangrove
351 prop roots as habitat for at least part of their life cycles.

352 **Goals and Objectives**

- 353 • Maintain the structure, function, and ecological processes of mangroves and prevent further loss,
354 fragmentation, or degradation (USFWS, 1999).
- 355 • Encourage the use of living shorelines incorporating mangroves and other estuarine species to
356 stabilize shorelines and improve habitat quality.
- 357 • Protect, restore and manage mangrove shorelines to support species diversity and provide suitable
358 habitat for fisheries, reduce coastal flooding, and provide riparian buffers.
- 359 • Where appropriate, reduce the linear extent of disturbed, eroding, and hardened shorelines to allow
360 for mangrove restoration and replanting in order to provide suitable forage and improved habitat
361 quality.
- 362 • Protect functional group diversity.

363 **Recurring Extreme Weather Events and Other Stressors and Impacts**

364 Mangroves in the SJBE are shaped by both natural ecological drivers and human influences, particularly
365 urbanization that alters hydrology through impervious surfaces, channelization, and stormwater routing.
366 These changes affect hydroperiods and contaminant transport, affecting mangrove growth and species

367 composition. Sea level rise is expected to drive mangrove migration upland, potentially displacing
 368 freshwater wetlands. However, urban development may restrict this natural migration, creating challenges
 369 for mangrove persistence. Increasing winter temperatures are also contributing to the northward expansion
 370 of mangroves into areas previously dominated by salt marshes, with implications for local biodiversity and
 371 ecosystem function. Living shorelines using mangroves offer a natural solution to coastal erosion and
 372 flooding, enhancing habitat quality and resilience in the face of sea level rise and extreme weather events.

373 **Key Activities**

Activities	Performance Measures	Targets	Lead Implementor(s) and Partner(s)	Timeframe	Estimated Costs	Potential Funding Sources
1. Develop projects to include reproduction. Planting, and monitoring urban mangrove to restore and improve habitat quality.	Assess changes in habitat quality metrics.	Evaluated the current hydrology of mangrove areas, identifying factors affecting water flow, salinity levels, and overall hydrological system.	Leads: DNER, USFWS Implementing partners: municipalities, academia, community groups	5+ years	TBD based on selected projects	DNER, USFWS
2. Engage community and stakeholders to align coastal development with mangrove conservation.	Increase in relevant stakeholders participating in mangrove conservation activities.	Identified stakeholders to collaborate with on aligning development with mangrove conservation.	Leads: DNER, Estuario Implementing partners: municipalities, academia, community groups	3-5 years	\$75,000	USEPA, DNER
3. Identify and map current mangrove habitats to determine restoration activity locations.	Review current maps and identify gaps in need of being surveyed.	Identified current conditions on mangroves.	Leads: DNER, Estuario Implementing partners: USFWS, municipalities, academia, community groups	0-2 years	TBD based on mapping needs	USEPA, DNER, USFWS

374 **Upland Urban Forests**

375 **Status**

376 Upland urban forests and subtropical moist secondary forest patches within the SJBE watershed are
 377 fragmented and embedded in a highly urbanized landscape. Tree inventories report 2,548 ha of mangrove
 378 plus subtropical moist secondary forests which is about 11.8% of the watershed, and an average urban tree
 379 cover of 24.1% in 2011 (Brandeis et al. 2014; Tucker Lima et al. 2013). The watershed contained an
 380 estimated 10.1 million trees in 2011 that stored 319,737 metric tons of carbon and sequestered roughly
 381 28,384 metric tons of carbon per year (Brandeis et al., 2014). These upland forest patches are often small,
 382 occur as remnant fragments or planted street/park trees, and are affected by invasion from nonnative
 383 ornamental and street trees in developed areas.

384 **Key Species**

385 Dominant species in moist forest patches and urban plantings include the non-native African tulip tree
 386 (*Spathodea campanulata*) and native Santa María (*Calophyllum antillanum*), alongside a mix of remnant native
 387 subtropical species at forest edges. Mangrove species (red, black, white) dominate shoreline and fringe
 388 areas, but transitional upland edges contain *Tabebuia* and native palms noted in regional inventories.

389 **Goals and Objectives**

- 390 • Conserve and increase functioning upland urban forest cover in priority SJBE areas.
- 391 • Increase native tree recruitment and planted native canopy species in urban neighborhoods by
 392 planting new street/park trees with native, drought and salt tolerant species.
- 393 • Reduce non-native tree dominance in remnant forest patches through removal.
- 394 • Maintain and enhance urban forest ecosystem services, such as increasing annual carbon
 395 sequestration and quantifying energy savings from tree shade in developed areas.
- 396 • Protect functional group diversity.

397 **Recurring Extreme Weather Events and Other Stressors and Impacts**

398 Hurricanes, tropical storms, and increasingly intense rainfall events cause direct tree mortality, canopy loss,
 399 and increased disturbance that opens space for non-native species establishment; urban forest mortality
 400 can be substantial following major storms (Tucker Lima et al., 2013). Urbanization stressors such as
 401 impervious surfaces, altered hydrology, heat island effects, soil compaction, and pollution for street trees
 402 increase baseline mortality and favor certain non-native or planted ornamental species (Tucker Lima et al.,
 403 2013). Mortality rates for street trees were lower in higher income neighborhoods, indicating potential
 404 equity considerations for urban tree canopy and maintenance investments (Tucker Lima et al., 2013).

405 **Key Activities**

Activities	Performance Measures	Targets	Lead Implementor(s) and Partner(s)	Timeframe	Estimated Costs	Potential Funding Sources
1. Inventory, prioritize, and map upland forest fragments and potential planting sites.	Identify potential planting sites.	Completed a prioritization map which displays urban forests and potential areas to increase connectivity.	Leads: DNER, U.S. Department of Agriculture (USDA) Implementing partners: municipalities, academia, community groups	3-5 years	\$250,000	DNER, USDA
2. Plant trees on streets and in parks to maximize stormwater interception and cooling.	Increase in tree survival rates for urban tree plantings.	Established annual planting targets and maintenance plans.	Leads: DNER, Estuario, USDA Implementing partners: municipalities, academia, community groups	3-5 years	TBD based on the number and type of trees	DNER, USDA

Activities	Performance Measures	Targets	Lead Implementor(s) and Partner(s)	Timeframe	Estimated Costs	Potential Funding Sources
3. Establish post-storm assessments to promote the vitality of urban trees and canopies.	Create follow-up actions in post-storm scenarios.	Developed metrics to evaluate urban trees and canopies, including structural integrity, canopy cover, and signs of damage.	Leads: DNER, USDA Implementing partners: municipalities, academia, community groups	3-5 years	\$100,000	DNER, USDA
4. Invest resources into community engagement and workforce development for urban forests.	Increase community engagement.	Engaged with community stakeholders to foster awareness, participation, and ownership of urban forestry initiatives.	Leads: DNER, Estuario, USDA Implementing partners: municipalities, academia, community groups	5+ years	\$75,000	DNER, USDA

406 **Habitat Response Monitoring**

407 Habitat response monitoring will establish reliable and cost-effective methods to systematically monitor and
 408 evaluate the execution and performance of the restoration actions. Monitoring and evaluation are essential
 409 to determine whether restoration projects were executed correctly as designed, and that the restoration
 410 goals were accomplished. Also, it helps to ensure that project and program resources are used efficiently
 411 and effectively (NOAA, 2026). Table 1 presents the key species, community, monitoring metrics and goals to
 412 be assessed as part of the habitat response monitoring.

413 **Table 1. Key species, community, monitoring metrics, and goals to be assessed by ecosystem type as part of the**
 414 **habitat response monitoring**

Ecosystem	Key species	Community	Metrics	Goals	Monitoring Frequency
Benthic Systems	Polychaetas	Benthic macroinvertebrates	Percent area cover	An increase in area cover.	5 years
Coral Reefs	Elkhorn coral (<i>Acropora palmata</i>) and Bourder star coral (<i>Orbicella annularis</i>)	Coral colonies	Percent area cover at permanent monitoring stations, biodiversity index	An increase in area cover and abundance of coral key species.	Quarterly
Seagrasses	Turtle grass (<i>Thalassia testudinum</i>)	Submerged aquatic vegetation (seagrass and macroalgae)	Percent area cover and species composition in permanent monitoring stations	An increase in area cover.	Quarterly
Seagrasses	Nonnative <i>Halophila stipulacea</i>	Submerged aquatic vegetation (seagrass and macroalgae)	Percent area cover	A decrease in abundance and area cover.	Quarterly
Beach Ecosystems	Sea grape (<i>Coccoloba uvifera</i>), Sea side bean (<i>Canavalia rosea</i>), Bayhops (<i>Ipomoea pes-caprae</i>), Batatilla (<i>Ipomoea imperati</i>), Saltmarsh cordgrass (<i>Spartina</i> sp.)	Coastal native plant	Percent survival rate, planted individual growth rate (millimeters per year [mm/year])	An increase in abundance. and plant length.	One month after planting and yearly after

Ecosystem	Key species	Community	Metrics	Goals	Monitoring Frequency
	and Ink berry (<i>Scaevola plumieri</i>)				
Beach Ecosystems	Beach profiles	Sand dunes	Sand dune growth rate (mm/year)	An increase in sand dunes height.	Yearly
Mangroves	Red mangrove (<i>Rhizophora mangle</i>), black mangrove (<i>Avicennia germinans</i>), and White mangrove (<i>Laguncularia racemosa</i>)	Aerial measurement of mangrove forest area cover	Percent survival rate and area cover, planted individual growth rate (mm/year)	An increase in area cover and growth rate.	One month after planting and yearly after
Upland Urban Forests	Non-native African tulip tree (<i>Spathodea campanulata</i>)	Protected areas and forest within the SJBE watershed	Percent survival rate, aerial area cover, planted individual growth rate (mm/year)	An increase in area cover and growth rate.	One month after planting and yearly after

415 **References**

416 Brandeis, T. J. et al. 2014. San Juan Bay Estuary Watershed urban forest inventory. USDA Forest Service,
 417 Southern Research Station. <https://research.fs.usda.gov/treesearch/45759>.

418 Branoff, B. L. 2019. Quantifying the influence of urbanization on Puerto Rico’s mangrove ecosystems.
 419 University of Puerto Rico, Río Piedras, PR.

420 Cerame Vivas, M. J. 2000. Ecología, Puerto Rico y pensamiento crítico. Editorial Centenario, S.A., Río Piedras,
 421 PR.

422 Díaz Velázquez, V., and M. Canals Silander. 2020. Erosión en Ocean Park de julio a agosto de 2019: causas,
 423 cambios y recuperación. Pages 120-123 in Programa del Estuario de la Bahía de San Juan, editor.

424 Diagnóstico de vulnerabilidad de la cuenca y el sistema del estuario de la Bahía de San Juan ante el impacto
 425 de huracanes. San Juan, PR.

426 DNER. 2005. Manual of procedures for the demarcation of the inland interior boundary of maritime-
 427 terrestrial public domain assets. San Juan, PR.

428 FEMA. 2018. Restoring Sand Dunes Along Puerto Rico’s North Coast. [https://www.fema.gov/press-
 429 release/20250602/restoring-sand-dunes-along-puerto-ricos-north-coast-0](https://www.fema.gov/press-release/20250602/restoring-sand-dunes-along-puerto-ricos-north-coast-0).

430 Filippo Ferrario, Michael W. Beck, Curt D. Storlazzi, Fiorenza Micheli, Christine C. Shepard and Laura Airoidi,
 431 2014. [The effectiveness of coral reefs for coastal hazard risk reduction and adaptation](#). [Nature
 432 Communications](#), Nature, vol. 5(1), pages 1-9.

433 Fields, C. A., and G. Jordan. 1972. Storm-waves wash along the north coast of Puerto Rico. Hydrologic
 434 Investigations Atlas HA-430. U.S. Geological Survey, Washington, D.C.

435 Folke, C., 2016. Resilience (republished). *Ecol. Soc.* 21 (4), 44.

436 Kaye, C. A. 1959. Shoreline features and Quaternary shoreline changes Puerto Rico. Geological Survey
 437 Professional Paper 317-B, Washington, DC. 140 p.

- 438 LG2 Environmental Solutions and CSA Ocean Sciences Inc. 2021. San Juan harbor mitigation and source, San
439 Juan, Puerto Rico. Benthic Resource Survey. CSA-LG2-FL-21-81695-3687-04-rep-01-VER01, Stuart, FL.
- 440 Lugo, A.E. and Bauzá Ortega, J.F. 2024. San Juan Bay Estuary: Research History and Opportunities. EPA
441 600/R-23/308. Office of Research and Development, Center for Environmental Measurement and Modeling,
442 Atlantic Coastal Environmental Sciences Division.
- 443 McLeod, K.L., Leslie, H.M. (Eds.), 2009. Ecosystem-based Management for the Oceans. Island Press,
444 Washington, DC.
- 445 McLeod, E., Anthony, K. R.N., Mumby, P. J., Maynard, J., Beeden, R., Graham, N. A.J., Heron, S. F., Hoegh-
446 Guldborg, O., Jupiter, S., MacGowan, P., Mangubhai, S., Marshall, N., Marshall, P. A., McClanahan, T. R.,
447 Mcleod, K., Nyström, M., Obura, D., Parker, B., Possingham, H. P., and Salm, R. V. (2019). The future of
448 resilience-based management in coral reef ecosystems. *Journal of Environmental Management*, 233, 291-301.
449 <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.11.034>.
- 450 NOAA. 2026. Guidance for Proposing and Conducting Tier 1 Monitoring. Accessed at
451 [https://www.fisheries.noaa.gov/national/habitat-conservation/monitoring-and-evaluation-restoration-](https://www.fisheries.noaa.gov/national/habitat-conservation/monitoring-and-evaluation-restoration-projects)
452 [projects](https://www.fisheries.noaa.gov/national/habitat-conservation/monitoring-and-evaluation-restoration-projects).
- 453 PBS&J. 2009. Development of the Benthic Index for San Juan Bay Estuary System: Final Report (September
454 2009). <https://estuario.org/wp-content/uploads/2021/02/SJBEP-Benthic-Index-Final-Report-compressed.pdf>.
- 455 Rodríguez, M., et al. 1992. Description of coral reef communities in San Juan Bay Estuary.
- 456 Rivera de Jesús, E. 2020. Evaluación de vulnerabilidad de los manglares en el estuario de la Bahía de San
457 Juan. Pages 82-85 in Programa del Estuario de la Bahía de San Juan, editor. Diagnóstico de vulnerabilidad de
458 la cuenca y el sistema del estuario de la Bahía de San Juan ante el impacto de huracanes. San Juan, PR.
- 459 Rivera, J. A. 2005. Findings on the benthic assessment of the San Juan Bay Estuary, Puerto Rico. NOAA
460 Fisheries, Southeast Fisheries Science Center, Miami Laboratory, Protected Resources and Biodiversity
461 Division, Miami, FL.
- 462 Tucker Lima, J. M. et al. 2013. Temporal dynamics of a subtropical urban forest in San Juan, Puerto Rico,
463 2001- 2010. USDA Forest Service, Southern Research Station. <https://research.fs.usda.gov/treesearch/47120>.