Laboratorio 5 – Persistent Tree (v2)

Este laboratorio tiene dos objetivos fundamentales:

1. Realizar una implementación de árboles binarios de búsqueda.
2. Implementar recorridos sobre árboles binarios.

Apartado 1: Implementación de los árboles binarios de búsqueda inmutables

Inmutabilidad y persistencia

En este laboratorio trabajaremos con **árboles binarios de búsqueda** (ABB), concretamente, con implementaciones **inmutables (o persistentes)** de las mismas. ¿Qué queremos decir con ello?

- **Inmutable**: una vez creado un árbol, éste no puede ser modificado. Es por ello las operaciones de modificación devuelven un nuevo árbol, con las modificaciones necesarias sobre el árbol original.
- **Persistente**: al crear el árbol modificado, no se destruye el árbol de partida, por lo que las referencias al árbol original se refieren al árbol antes de las modificaciones.

Fijaos en que las estructuras de datos que hemos visto hasta el momento no son persistentes, por ejemplo:

```
List<Integer> li = new LinkedList<>()
li.add(2);
List<Integer> li2 = li;
li.add(3);
```

Aunque hayamos "capturado" la lista antes del segundo add, la referencia li2 se refiere a la misma lista que li y, por tanto, los cambios que desde li son visibles desde li2.

Si quisiéramos que li2 se refiriera a la lista antes del segundo add, deberíamos **hacer una copia** de la lista, es decir:

```
List<Integer> li = new LinkedList<>();
li.add(2);
List<Integer> li2 = new LinkedList<>(li);
li.add(3);
```

Es decir, como trabajamos con estructuras de datos mutables, hemos de hacer copias si queremos poder volver a acceder al valor que tenía la estructura antes de hacer una modificación.

Fijaos en que si, por ejemplo, trabajáramos con *Strings*, al ser estos una estructura de datos inmutable, jamás podríamos añadir un carácter al *String*; en cambio podremos construir un nuevo *String*, a partir del original, añadiéndole nuevos caracteres (por lo que, si no perdemos su referencia, siempre podremos acceder al valor original del mismo):

```
String original = "patata";
String modified = original + "s";
```

Estas estructuras inmutables son utilizadas en el paradigma de **programación funcional** y también en **programación concurrente**, ya que, al no poderse modificar, pueden ser accedidas concurrentemente por varios hilos de ejecución[1].

Árboles binarios de búsqueda persistentes

Por lo tanto, en nuestro caso, un ABB **no podrá ser modificado** y, por ello, las operaciones que realicen una "modificación" sobre el ABB (inserción y eliminación) deberán **devolver un nuevo ABB**, y no alterarán aquél sobre el que se apliquen.

Tal y como se ha visto en el tema 4, los ABBs ofrecen una estructura de datos utilizada para asociar valores a claves para, posteriormente, recuperar el valor a partir de la clave. Se definen como:

- Un árbol binario vacío.
- Un árbol binario donde:
  - Cada nodo contiene una pareja (clave, valor).
  - No hay dos nodos con el mismo valor de la clave.
  - La clave de la raíz es mayor[2] que todas las claves del subárbol (hijo) izquierdo.
  - La clave de la raíz es menor que todas las claves del subárbol (hijo) derecho.
  - El subárbol izquierdo es un ABB.

[1] Para que esto sea realmente cierto, no sólo el ABB debe ser inmutable, sino que los elementos que contenga también deben serlo. Este punto, cierto en el paradigma de programación funcional, no puede ser comprobado por el compilador de Java, y de ello es una de las razones por las que la programación funcional cada día es más importante.

[2] Al no haber claves repetidas las comparaciones son estrictas.

- El subárbol derecho es un ABB.

Las siguientes figuras, muestran un ejemplo de ABB (Figura 1) y otro que no lo es (Figura 2), ya que el nodo con clave 35 no puede pertenecer al subárbol derecho del nodo con clave 40:

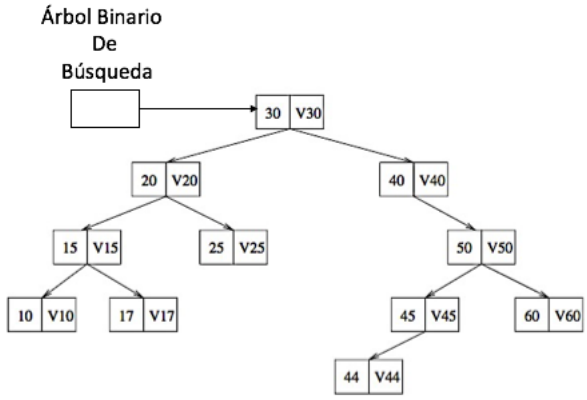


Figura 1. Ejemplo ABB

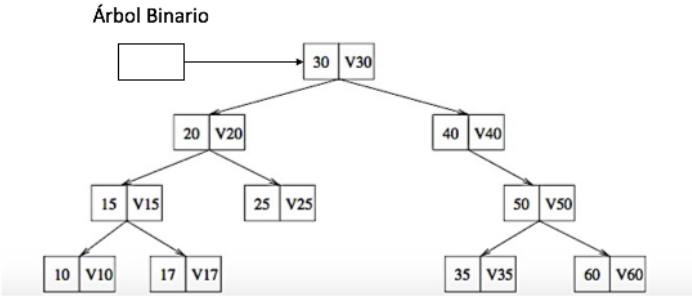


Figura 2. Ejemplo de árbol binario que no es de búsqueda

BinarySearchTree<E>

Esta interfaz declarará las operaciones que podremos realizar sobre los árboles binarios de búsqueda inmutables:

```
public interface BinarySearchTree<K, V> {
    boolean isEmpty();
    boolean containsKey(K key);
    V get(K key);
    BinarySearchTree<K, V> put(K key, V value);
    BinarySearchTree<K, V> remove(K key);
}
```

Fijaos en que las operaciones put y remove devuelven un *BinarySearchTree<K, V>*, que es el árbol resultado de hacer la modificación.

Sus operaciones se comportan de la siguiente manera:

- *isEmpty()* devuelve *true* si el ABB está vacío y *false* en caso contrario.
- *containsKey(K key)* devuelve *true* si el ABB contiene la clave *key*.
    - Si *key* es *null* lanza *NullPointerException* (excepción no comprobada predefinida).
- *get(K key)* devuelve el valor asociado a la clave *key*.
    - Si *key* es *null* lanza *NullPointerException* (excepción no comprobada predefinida).
    - Si no existe *key* en el ABB, lanza *NoSuchElementException* (excepción no comprobada predefinida).
- *put(K key, V value)* devuelve un nuevo ABB basado en aquél desde el que se realiza la llamada, pero añadiendo un nuevo nodo con la pareja (*key*, *value*).
    - Esto implica que el árbol origen y el que es devuelto, **compartan aquellos nodos que no se han visto modificados**.
    - Aquellos nodos que hayan sido modificados como resultado de añadir la pareja (key, value) serán duplicados para el nuevo ABB.
    - Si *key* existe en el ABB de origen se modificará su actual valor por *value* **generando un nuevo nodo que represente esta modificación para el árbol devuelto**.
    - Si *key* o *value* son *null* lanza *NullPointerException* (excepción no comprobada predefinida).
- *remove(K key)* devuelve un nuevo ABB basado en aquel desde el que se realiza la llamada, pero eliminando la asociación establecida con la clave *key*.
    - Aquellos nodos que se han recorrido en la eliminación de (*key*, *value*) serán duplicados para el nuevo ABB.
    - Esto implica que el árbol de origen y el que es devuelto, **compartan aquellos nodos que no se han recorrido.**
    - Si existe *key* en el ABB, devuelve el nuevo ABB generado. En caso contrario, también se devolverá un nuevo ABB.
        - Esto simplifica la programación (de hecho, la estructura del código es muy parecida a la del caso de la inserción), pero ocupa más espacio del necesario.
        - Por ello, una de las propuestas de la parte optativa consiste, precisamente, en mejorarlo.
    - Si *key* es *null* lanza *NullPointerException* (excepción no comprobada predefinida).

Clase *LinkedBinarySearchTree<E>*

Esta será la clase que implementará el árbol binario de búsqueda por medio de la interfaz anterior (cumpliendo las especificaciones de las operaciones) **usando nodos enlazados**.

La estructura general de la clase *LinkedBinarySearchTree<K, V>* podría ser la siguiente[3]:

```
public class LinkedBinarySearchTree<K, V>
        implements BinarySearchTree<K, V> {

    private final Node<K, V> root;
    private final Comparator<? super K> comparator;

    private static class Node<K, V> {
        private final K key;
        private final V value;
        private final Node<K, V> left;
        private final Node<K, V> right;

        // ¿?

    }

    public LinkedBinarySearchTree(Comparator<? super K> comparator) {
        // ¿?
    }

    private LinkedBinarySearchTree(
            Comparator<K> comparator,
            Node<K, V> root) {
        // ¿?
    }

    @Override
    public boolean isEmpty() {
        // ¿?
    }

    @Override
    public boolean containsKey(K key) {
        // ¿?
    }

    @Override
    public V get(K key) {
        // ¿?
    }

    @Override
    public LinkedBinarySearchTree<K, V> put(K key, V value) {
        // ¿?
```

[3] Fijaos en que todos los atributos de instancia son finales para "ayudar", pues no puede garantizarse si hacen referencia a objetos mutables, a la inmutabilidad de la estructura.

```
    }

    @Override
    public LinkedBinarySearchTree<K, V> remove(K key) {
        // ¿?
    }

}
```

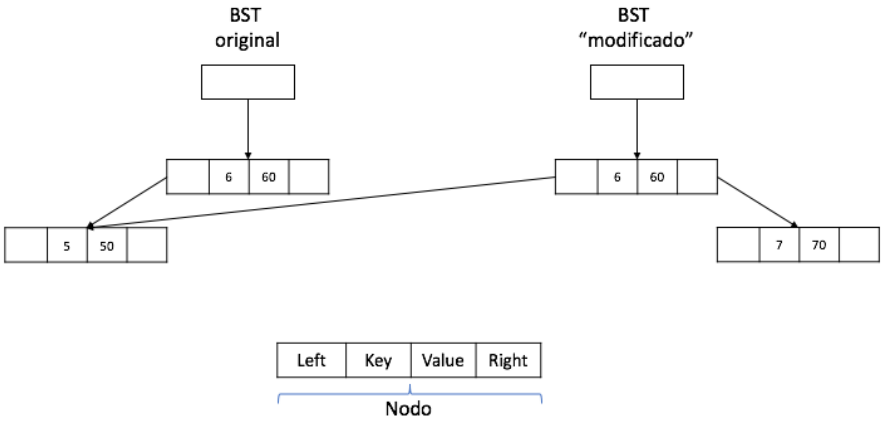


Figura 3. Ejemplo de la operación *put* sobre el árbol de búsqueda original. El resultado será el árbol de búsqueda modificado.

En base a la implementación de *LinkedBinarySearchTree<K, V>*, ahora podemos mostrar dos ejemplos sobre cómo funcionan las operaciones *put* y *remove*, a través de la Figura 3 y Figura 4, respectivamente.

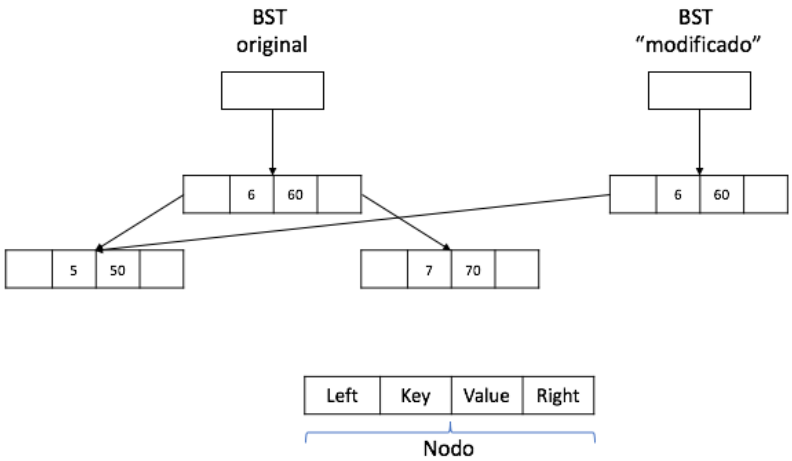


Figura 4. Ejemplo de la operación *remove* sobre el árbol de búsqueda original. El resultado será el árbol de búsqueda modificado.

Finalmente, el ABB no deberá equilibrarse, con lo que las operaciones de búsqueda, inserción y eliminación no serán necesariamente logarítmicas.

Consideraciones para la realización de los test del apartado 1

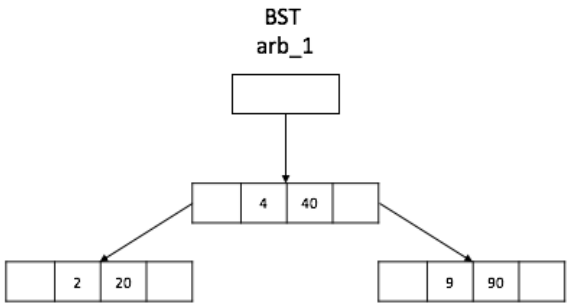
A la hora de construir un árbol binario de búsqueda para hacer un test, **se pide explícitamente que lo construyáis solamente en base al constructor de la clase *LinkedBinarySeachTree<K, V>* (que os crea un árbol vacío) y de la operación *put* de la interfaz *BinarySearchTree<K, V>, que os asocia un valor a una clave en el árbol*** y, a partir del árbol creado, podréis comprobar el resto de las operaciones de la interfaz. Y esto implica conocer cuál será el orden necesario para generarlo.

Por lo tanto, en este primer apartado, no se podrá hacer uso de *left()* o *rigth()* que aparecerán en el segundo apartado para comprobar propiedades sobre el árbol binario de búsqueda.

Para ver si habéis comprobado todas las posibilidades de las operaciones, es decir, todas las posibilidades de construcción de árboles, deberéis ser capaces de, dada una secuencia de *put*s, saber la estructura del árbol.

Por ejemplo, en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, para l legar al árbol binario de búsqueda *arb_1*, debemos realizar la sucesión de operaciones que se muestra en la misma **¡Error! No se encuentra el origen d e la referencia.** en el orden concreto que se indica. En este sentido, primero se construye *arb_1* y posteriormente, haciendo uso de *put,* se añaden los nodos con clave 40, 20 y 60.

En el ejemplo de la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, se p uede comprobar que se enlazan operaciones en la creación de *arb_1*. Esto puede servir de ayuda para facilitar la realización de las pruebas.




```
LinkedBinaryTree<Integer, Integer> arb_1 = new LinkedBinaryTree<>() arb1;
arb_1 = abr_1
        .put(4, 40)
        .put(2, 20)
        .put(9, 90);
```

Figura 5. Ejemplo del orden de las operaciones a la hora de llegar a un árbol binario de búsqueda concreto desde otro original

Por ello, para ver si aún quedan casos por comprobar, en la elaboración de las pruebas de esta tarea, se recomienda que, al ejecutar el código de prueba, se realice con la **opción de cobertura de código**[4] para que IntelliJ indique aquellas líneas que han sido cubiertas con la prueba. Ello no es garantís de haber cubierto todos los casos, pero es una ayuda.

Dicha ejecución puede realizarse para todos las priebas (Figura 6) o sobre una en concreto (Figura 7).

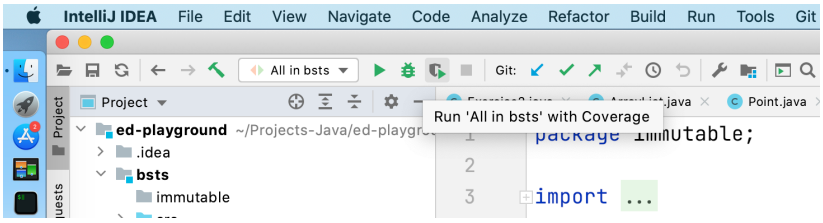


Figura 6. Ejecución de todos los test con cobertura

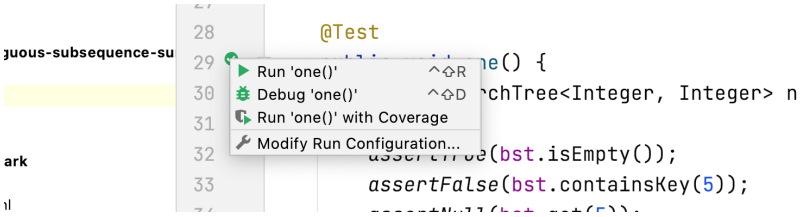


Figura 7. Ejecución de un test concreto con cobertura

Una vez ha sido ejecutado de esta manera, el entorno IntelliJ nos informará de qué líneas de código han sido ejecutadas con la prueba. La mejor manera de comprobarlo es por medio de la información visual que nos ofrece en el código que ha sido testeado. Aquello marcado con verde representa código cubierto por la prueba y en rojo el que no (Figura 8).

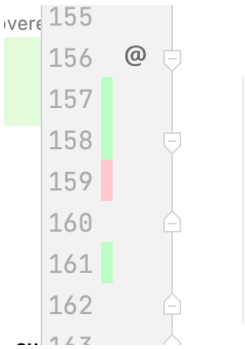


Figura 8. Marcas visuales de IntelliJ

Podéis comprobar que el entorno ofrece también información sobre el porcentaje de líneas cubiertas y no cubiertas. Sin embargo, esta información contiene cierto porcentaje relativo a interfaces (en el caso de este laboratorio)

[4] https://www.jetbrains.com/help/idea/code-coverage.html

que no nos es útil. Por lo tanto, en nuestro caso es mejor acceder al código testeado y comprobar visualmente (indicaciones visuales rojas y verdes) para saber qué código ha sido cubierto por la ejecución.

En el informe correspondiente a esta parte explicaréis el diseño de cada una de las operaciones de la clase *LinkedBinarySeachTree<K, V>*. Ayudaros de diagramas para que la explicación resulte entendible.

Apartado 2: Recorridos sobre árboles binarios de búsqueda inmutables

En este segundo apartado se deberá implementar el **recorrido en inorden** sobre el ABB implementado en la tarea anterior.

Deberá ser implementado **fuera de la clase** *LinkedBinarySearchTree<K, V>* en su **versión iterativa**, utilizando la transformación a iterativo que se vio en el laboratorio 4.

Para poder implementar el recorrido, deberemos poder acceder a los subárboles derecho e izquierdo de un árbol y a su raíz, para lo que definiremos la interfaz *BinaryTree<E>*:

```
public interface BinaryTree<E> {
    boolean isEmpty();
    E root();
    BinaryTree<E> left();
    BinaryTree<E> right();
}
```

Y partiremos de esta implementación del recorrido en inorden:

```
public class Traversals {

    public static <E> List<E> inorder(BinaryTree<E> tree) {
        List<E> result = new ArrayList<>();
        inorderRec(result, tree);
        return result;
    }

    private static <E> void inorderRec(List<E> result,
                                       BinaryTree<E> tree) {
        if (!tree.isEmpty()) {
            inorderRec(result, tree.left());
            result.add(tree.root());
            inorderRec(result, tree.right());
        }
    }
}
```

Como implementación de la pila, tal y como sugiere la documentación de Java, en vez de usar la clase *Stack*

https://docs.oracle.com/en/java/javase/15/docs/api/java.base/java/util/Stack.html

usaremos la interfaz **java.util.Deque**

https://docs.oracle.com/en/java/javase/15/docs/api/java.base/java/util/Deque.html

y una de sus implementaciones (**ArrayDeque** o **LinkedList**):

https://docs.oracle.com/en/java/javase/15/docs/api/java.base/java/util/ArrayDeque.html

https://docs.oracle.com/en/java/javase/15/docs/api/java.base/java/util/LinkedList.html

en concreto, los métodos *addFirst* (para *push*), *getFirst* (para *top*) y *removeFirst* (para *pop*), que son los que lanzan *NoSuchElementException* en los casos erróneos, así como *isEmpty* (que se hereda de *Collection*).

Por tanto, deberemos retocar la clase *LinkedBinarySearchTree<K, V>* para que implemente la interfaz *BinaryTree<Pair<K, V>>* y así poder realizar recorridos en inorden de un árbol binario de búsqueda.

De este modo, *LinkedBinarySearchTree<K, V>* tendrá el siguiente aspecto:

```
public class LinkedBinarySearchTree<K, V>
        implements BinarySearchTree <K, V>,
                   BinaryTree<Pair<K, V>> {

    //...

    @Override
    public Pair<K, V> root(){
        // ¿?
    }

    @Override
    public LinkedBinarySearchTree<K, V> left() {
        // ¿?
    }
```

```
        @Override
        public LinkedBinarySearchTree<K, V> right() {
            // ¿?
        }

        public List<Pair<K, V>> inOrder() {
            // ¿?
        }

        //...
    }
```

Y, a la clase Traversals, deberemos añadir e implementar el método:

```
public static <E> List<E> inorderIterative(BinaryTree<E> tree) { ¿? }
```

Que, como ya se ha indicado, **deberá obtenerse aplicando el mecanismo de transformación a iterativo presentado en el Laboratorio 3** a la implementación recursiva del recorrido presentado más arriba.

En el informe correspondiente a esta parte deberéis explicar cómo habéis aplicado la transformación a iterativo. Si habéis hecho alguna simplificación de ésta, explicad tanto la solución sin simplificar como la simplificación realizada.

Tareas complementarias

Como primera tarea complementaria, se propone mejorar la operación *remove* de la clase *LinkedBinarySearchTree<K, V>*. En concreto, la mejora se aplica al caso de la eliminación de una clave del árbol que no se encuentra en él.

En este caso, tal y como se ha implementado, se han ido duplicando nodos, a pesar de que ninguno se ha visto modificado (Figura 9) y dicha duplicación de nodos debería ser innecesaria.

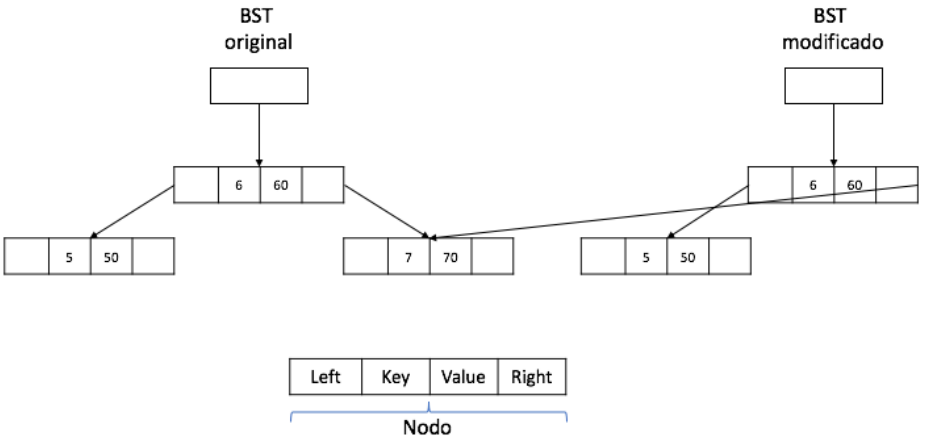


Figura 9. Ejemplo de *remove* sin mejorar.
La operación realizada es *remove(1)* sobre BST original.

De hecho, lo mismo afecta cuando hacemos un put y asociamos a una clave un valor que ya era igual al asociado previamente en el ABB.

Otra ampliación muy interesante consiste en implementar iteradores sobre los árboles binarios, recordad, en preorden, inorden y postorden, mediante el uso de una pila. La idea sería aplicar el esquema de transformación iterativo visto en el Laboratorio 4 (y aplicado a la segunda parte de esta práctica) y estructurarlo de manera que, a cada invocación de *next* sobre el iterador, se ejecute el código necesario para obtener el siguiente elemento en la iteración (la pila formaría parte del estado del iterador en cada momento).

Para implementar la operación *hasNext* es conveniente que el iterador en todo momento precalcule el siguiente elemento que devolverá *next*: si éste ha podido precalcularse, *hasNext* es cierto; si no, falso.

Un tema que tampoco hemos comentado es que un árbol binario solamente es eficiente cuando está balanceado (o ligeramente desbalanceado). Si no se cumple esta propiedad, inserciones y búsquedas tienen coste O(n) en vez del coste O(log n) deseado. Si queréis explorar el tema del balanceo (o equilibrio) de los árboles, podéis empezar consultando el código de la clase *TreeMap* de la biblioteca estándar de java:

- Implementación
- Documentación

Esta clase está diseñada utilizando una estructura de árbol binario de búsqueda que se conoce como Red-Black-Tree.

Otro tipo de árbol de búsqueda balanceado, cuya implementación es más complicada que los árboles rojo-negro, son los AVL-Trees.

Otras consideraciones

No olvidéis compilar usando la opción `-Xlint:unchecked` para que el compilador os avise de más errores en el uso de genéricos.

Entrega

El resultado obtenido debe ser entregado como un archivo comprimido en **formato ZIP** y con el nombre "Lab5_NombreIntegrantes". En el fichero se incluirá:

- El proyecto IntelliJ con el código y las pruebas con JUnit 5
- El informe, **en formato PDF**, en el cual se explique la solución a cada una de las tareas.

Consideraciones de Evaluación

A la hora de evaluar el laboratorio se tendrán en cuenta los siguientes aspectos:

- El código de cada proyecto ofrece una solución a cada una de las tareas planteadas.
- Realización de pruebas con JUnit 5
- La explicación es entendible y describe correctamente vuestra solución del problema.
- Calidad y limpieza del código.